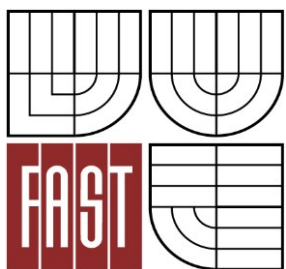




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ KRAJINY**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF LANDSCAPE WATER MANAGEMENT

# **ANALÝZA VYBRANÝCH VLIVŮ NA VODOHOSPODÁŘSKÉ ŘEŠENÍ ZÁSOBNÍ FUNKCE SOUSTAVY NÁDRŽÍ**

ANALYSIS OF SELECTED EFFECTS ON WATER MANAGEMENT SOLUTION STORAGE  
FUNCTION OF RESERVOIR SYSTEM

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**MARTINA ČECHOVÁ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. PAVEL MENŠÍK, Ph.D.**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav vodního hospodářství krajiny

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Martina Čechová
<b>Název</b>	Analýza vybraných vlivů na vodohospodářské řešení zásobní funkce soustavy nádrží
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	Ing. Pavel Menšík, Ph.D.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2012
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	24. 5. 2013
V Brně dne 30. 11. 2012	

.....  
prof. Ing. Miloš Starý, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Abstrakt**

Bakalářská práce řeší vliv účinku ztrát vody výparem ve vodohospodářském řešení zásobní funkce soustavy nádrží. Ke stanovení velikosti vlivu ztrát vody výparem je použit simulační model. Simulační model je vytvořen programem SOMVS. Stanovení velikosti ztrát vody z nádrží je provedeno zjednodušeným způsobem. Ztráty vody výparem jsou řešeny pro vybrané stupně zabezpečení výparu. Pro nalezení optimální velikosti zásobního objemu navrhované nádrže jsou použity všechny optimalizační metody obsažené v programu SOMVS, tj. metoda mřížková, metoda Monte Carlo, modifikovaná gradientní metoda a metoda diferenciální evoluce.

## **Klíčová slova**

nádrž, simulační model, systém zásobení vodou, vodohospodářská soustava, zásobní funkce

## **Abstract**

The bachelor thesis deals with the influence of the effect of water loss by evaporation in the water management solution storage function of reservoir system. To determine the size of the effect of water loss by evaporation is used simulation model. The simulation model is created with SOMVS. Determining the size of water losses from reservoirs is made simplified method. Loss of water by evaporation is solved for selected level hydrologic reliability of evaporation. To find the optimal size of the storage volume of the proposed reservoir are used all optimization methods included in the SOMVS, that is the grid method, Monte Carlo method, the modified gradient method and differential evolution.

## **Keywords:**

reservoir, simulation model, water supply system, water management system, storage function

**Bibliografická citace VŠKP**

ČECHOVÁ, Martina. *Analýza vybraných vlivů na vodohospodářské řešení zásobní funkce soustavy nádrží*. Brno, 2013. 48 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Vedoucí práce Ing. Pavel Menšík, Ph.D..

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2013

.....  
Martina Čechová

### **Poděkování**

Ráda bych poděkovala vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Pavlovi Menšíkovi, Ph.D. za trpělivost, vstřícnost, cenné rady a důležité připomínky během psaní práce. Svým rodičům, kteří mi umožnili studium a byli mi v celém jeho průběhu pevnou oporou. A v neposlední řadě děkuji svému příteli za to, že mě podporoval v době, kdy jsem to nejvíce potřebovala.

.....  
Martina Čechová

## Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíl práce .....	6
3. Matematický model zásobní funkce vodohospodářské soustavy.....	7
3.1. Definice systému .....	7
3.2. Formulace úlohy optimálního rozvoje.....	9
3.3. Metody řešení úlohy optimálního rozvoje.....	11
3.4. Ztráty vody z nádrží.....	14
3.4.1. Zjednodušený výpočet ztrát vody ze stávajících nádrží.....	15
3.4.2. Zjednodušený výpočet ztrát vody z navrhovaných nádrží .....	18
3.5. Účinek vlivu mezipovodí.....	18
3.6. Program SOMVS.....	18
4. Praktická aplikace .....	20
4.1. Schematizace subsystému nádrží.....	21
4.2. Parametry ztrát vody z nádrží .....	23
4.3. Řídící rovnice řešeného subsystému nádrží.....	30
5. Shrnutí výsledků.....	41
6. Závěr.....	43
Seznam použitých zdrojů .....	44
Seznam použitých zkratk a symbolů .....	45
Seznam obrázků a tabulek.....	47

## 1. Úvod

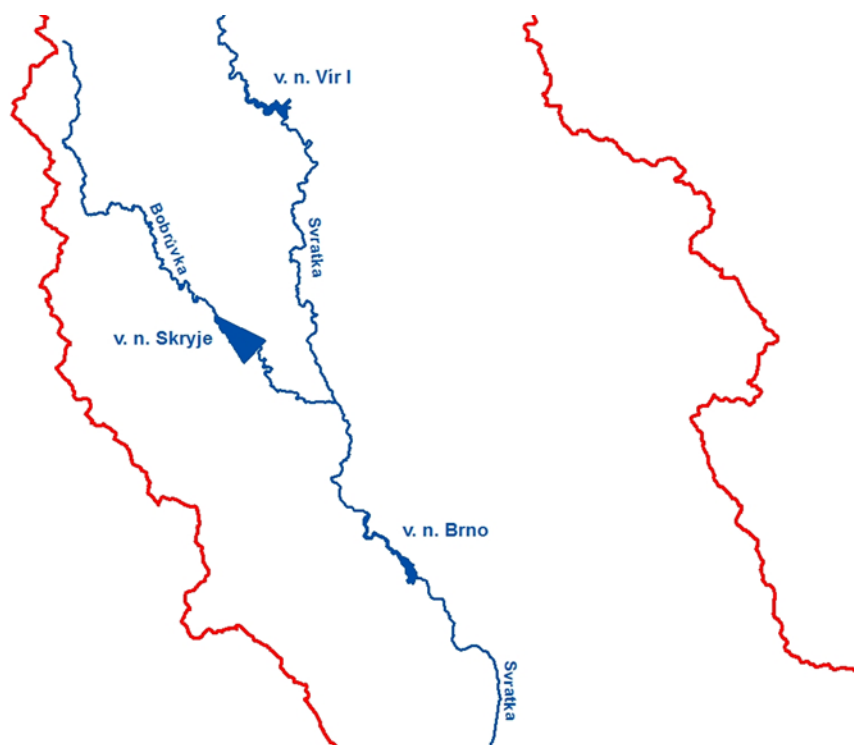
Jednou z hlavních funkcí vodohospodářské nádrže je funkce zásobní. Vedle ostatních funkcí jako je třeba ochrana před povodněmi, byla do dnešní doby tato funkce řešena hlavně kvůli dodávce pitné, závlahové a technologické vody.

Od počátku 20. století si lze povšimnout, jak se ve všech oborech začínají objevovat otázky ohledně globálního oteplování. V moderní době je sucho hlavním problémem zemědělců, kteří vlivem nedostatku srážek v určitém časovém období nemají dostatek vody k zavlažování hospodářských rostlin. Tento moderní růst teplot se časově shoduje s růstem sluneční aktivity v tomto období, ale tento výrazný nárůst sluneční aktivity není rozhodujícím faktorem. K růstu teplot pravděpodobně také přispělo zvyšování koncentrace skleníkových plynů v atmosféře v důsledku lidské činnosti, jako je odlesňování a spalování fosilních paliv.

Důležitým prvkem při řešení zásobní funkce nádrží jsou ztráty vody z nádrže. Ztráty vody z nádrže se obecně dají rozdělit do tří skupin a to jako ztráty výparem z volné vodní hladiny, ztráty průsakem hráze a ztráty netěsností uzávěrů. Největší objem ztrát z nádrže v průběhu roku způsobí výpar z volné vodní hladiny. K výpočtu výparu z vodní hladiny se při vodohospodářském řešení zásobní funkce běžně používají vztahové křivky. Vztahové křivky vyjadřují závislost mezi úhrnem ročního výparu na nadmořské výšce vodní hladiny a stupni zabezpečení výparu.

V práci je řešen účinek vlivu ztrát vody na vodohospodářské řešení zásobní funkce vybrané vodohospodářské soustavy. Vybraná vodohospodářská soustava se nachází v povodí řeky Svratky. Soustava nádrží je tvořena dvěma stávajícími nádržemi Vír I (dále Vír) a nádrží Brno. Stávající nádrže jsou doplněny o novou fiktivní nádrž. Fiktivní (navrhovaná) nádrž se nachází na vodním toku Bobrůvka v profilu Skryje – viz obr. 1. Na hledané velikosti zásobního prostoru nádrže Skryje je posuzován vliv ztrát vody výparem.





**Obr. 1** Vybraná vodohospodářská soustava, převzato z (Menšík, 2012).

Pro seznámení s důležitými údaji o soustavě jsou zde uvedeny základní informace o každém vodním díle a jeho nejbližším okolí. Informace jsou převzaty z internetových stránek Povodí Moravy s. p. a ze směrného vodohospodářského plánu ČSR.

## Vír

Nádrž byla postavena na 114,9 km na pravém břehu po toku řeky Svatky. Nachází se v povodí Moravy a byla uvedena do provozu roku 1957. Účelem nádrže je zajišťovat trvalé minimální průtoky v řece, udržovat vodu pro vodárenský odběr, nadlepšovat průtoky pro energetické využití ve špičkové vodní elektrárně Vír, zajišťovat protipovodňovou ochranu a nadlepšovat průtoky pro závlahy pod Brnem. Jedná se o betonovou gravitační hráz s výškou 66,2 m, délkou 390 m a šířkou v koruně 9 m. V tab. 1 jsou uvedeny základní informace o nádrži.



**Obr. 2** Přehrada Vír.

**Tab. 1** Základní informace o nádrži Vír.

Základní údaje o nádrži:	
Stálé nadržení:	3,800 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina stálého nadržení:	421,45 [m n. m.]
Zásobní prostor:	44,056 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina zásobního prostoru:	464,45 [m n. m.]
Prostor retenční ovladatelný:	5,286 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina retenčního ovlad. prostoru:	467,05 [m n.m.]
Prostor retenční neovladatelný:	3,051 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina retenčního neovlad. prostoru:	468,45 [m n.m.]
Celkový objem:	56,193 [mil. m <sup>3</sup> ]

## Skryje

Jedná se o navrhovanou nádrž, která doplňuje stávající nádrže Vír a Brno, za účelem zlepšení průtokové bilance v řece Svratce. Nádrž leží na řece Bobrůvce v povodí Moravy, v Jihomoravském kraji poblíž města Žďár nad Sázavou. Hráz by byla zemní s jílovým těsněním o výšce 58,4 m a délce 260 m. Na obr. 3 je zobrazena zájmová lokalita.



**Obr. 3** Katastrální mapa obce Skryje a okolí M 1:22 000,  
převzato z (<http://www.geoportal.cuzk.cz>).

**Tab. 2** Základní informace o nádrži Skryje.

Základní údaje o nádrži:	
Stálé nadržení:	1,500 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina stálého nadržení:	334,70 [m n. m.]
Zásobní prostor:	26,50 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina zásobního prostoru:	373,90 [m n. m.]
Hladina retenčního ovlad. prostoru:	373,90 [m n. m.]
Prostor retenční neovladatelný:	33,00 [mil. m <sup>3</sup> ]
Celkový objem:	56,193 [mil. m <sup>3</sup> ]

## Brno

Nádrž Brno leží na 56,19 kilometru na řece Svratce, spadající do povodí Moravy. Je postavena za účelem výroby elektrické energie ve špičkové vodní elektrárně, snížení povodňových průtoků, částečně i kvůli rekreaci, plavbě a rybářství. Nádrž byla uvedena do provozu roku 1940. Jedná se o betonovou gravitační hráz se šířkou v koruně 3m, výškou hráze 23,5 m a délkou 120 metrů.



**Obr. 4** Brněnská přehrada.

**Tab. 3** Základní informace o nádrži Brno.

Základní údaje o nádrži:	
Stálé nadržení:	2,082 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina stálého nadržení:	219,00 [m n. m.]
Zásobní prostor:	13,02 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina zásobního prostoru:	229,08 [m n. m.]
Prostor retenční neovladatelný:	2,60 [mil. m <sup>3</sup> ]
Hladina retenčního neovlad. prostoru:	230,08 [m n. m.]
Celkový objem:	17,02 [mil. m <sup>3</sup> ]



## 2. Cíl práce

Úkolem bakalářské práce je provést analýzu velikosti účinku ztráty vody výparem na vodohospodářské řešení zásobní funkce vybrané soustavy nádrží. Řešení je provedeno pro různé zabezpečení průměrného ročního výparu. K řešení je použit simulační model, který je automatizovaně sestaven programem SOMVS. Stanovení velikosti ztrát vody z nádrží je provedeno zjednodušeným způsobem. Samotné řešení je provedeno v reálné průtokové řadě. Pro ověření správnosti nalezení optimálního řešení jsou použity všechny optimalizační metody obsažené v programu SOMVS, tj. metoda mřížková, metoda Monte Carlo, modifikovaná gradientní metoda a metoda diferenciální evoluce.

### 3. Matematický model zásobní funkce vodohospodářské soustavy

Vodohospodářskou soustavu definujeme, jako množinu vodohospodářských prvků, spojených vzájemnými vazbami v účelový celek. Při definici vodohospodářské soustavy systémem zásobení vodou je ze soustavy vyjmuta pouze ta množina prvků a vazeb, která má přímý vliv na funkci zásobení vodou. Množina vyjmutých prvků a vazeb je schematizována pomocí grafu v podkapitole 3.1. Na schematizovaném grafu můžeme řešit dva základní typy úloh. Při pevně definované podobě grafu řešíme pouze tok vody – úloha optimálního řízení. Naopak je tomu v případě, kdy podoba grafu přestane být dostačující a hledá se její nová podoba – úloha optimálního rozvoje. Obě úlohy představují optimalizační problém. K nalezení optimálního řešení je možné použít přímou optimalizační metodu nebo simulační model. Rozdíl obou přístupů je ve způsobu řešení. Pro stanovení zásobního objemu navrhované nádrže Skryje je nutno použít úlohu optimálního rozvoje. Úloha optimálního rozvoje je formulovaná v podkapitole 3.2. Způsob řešení formulované úlohy je popsán v podkapitole 3.3. Do vodohospodářského řešení zásobní funkce nádrže jsou zavedeny ztráty vody z nádrží a účinek mezipovodí. Způsob řešení zohledňující vliv ztrát vody z nádrží a účinek mezipovodí je popsán v podkapitole 3.4, respektive v podkapitole 3.5.

#### 3.1. Definice systému

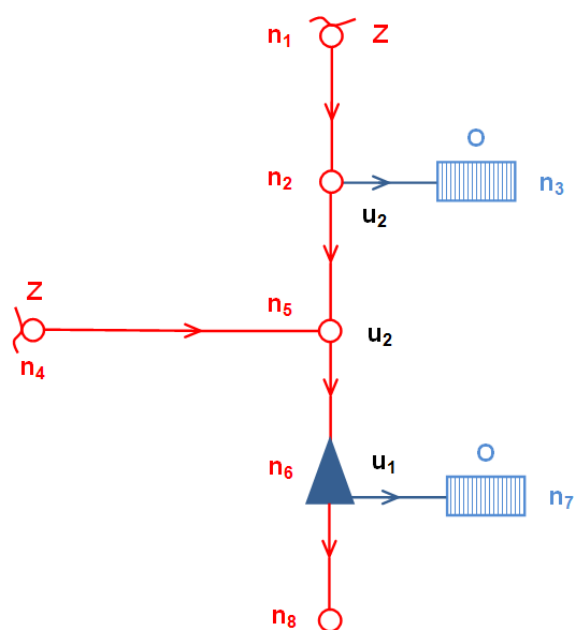
Systém zásobení vodou je možné definovat konstrukcí orientovaného, ohodnoceného grafu  $G(N, H)$  (Starý, 1986), tvořeného množinou vrcholů grafu  $N(n_i \in N)$  a hran grafu  $H(H_{i,j} \in H)$ . Množinu vrcholů  $N$  je možno rozdělit na tyto podmnožiny:

- vodní zdroje  $Z$ , která je tvořena vrcholy  $Z \in z$
- mezilehlé uzly řízení  $U$ , které jsou tvořeny vrcholy  $u \in U$  (množina mezilehlých uzlů řízení  $U$  se dělí na dvě podmnožiny)
  - $U_1$ , která zahrnuje pouze uzly řízení, které mají schopnost regulovat v čase průtok vody v toku pomocí svého objemu (nádrže)
  - $U_2$ , které obsahuje pouze rozdělovací uzly
- odběratele  $O$ , kteří jsou tvořeny vrcholy  $o \in O$

Obecně tedy může  $n_i \in Z$ ,  $n_i \in U$  nebo  $n_i \in O$ . Hrany tohoto grafu  $h_{i,j}$  (nebo  $n_i, n_j$ ), které vycházejí z  $i$ -tého vrcholu a končí v  $j$ -tém vrcholu, tvoří množinu  $H(h_{i,j} \in H)$ . Hrany grafu

tvoří koryta řek. Graf  $G(N, H)$  je jednoznačně zadán určením množiny  $N$  a  $H$ . Množinu  $N$  je možno psát ve tvaru:

$$N = Z + U + O. \quad (1)$$



**Obr. 5** Příklad orientovaného grafu, převzato z (Menšík, 2012).

Očíslování vrcholů  $n_1, n_4 \in Z$ ;  $n_2, n_5 \in U$  a  $n_3, n_7, n_8 \in O$ . Orientace hran grafu je dána po směru toku vody systémem. Průtok vody hranou grafu je obecně definován jako  $Q_{ij}(x, t)$ . Za předpokladu, že doba dotoku (doba, za kterou voda proteče celý systém) je výrazně kratší než délka časového kroku  $\Delta t$ , je možné zanedbat přechodové jevy ve hranách grafu. Při platnosti výše uvedeného předpokladu je průtok na začátku hrany grafu stejný jako průtok na konci hrany grafu. Délka časového kroku při strategickém řízení odtoku je jeden měsíc, ale může být delší i kratší. Při délce kroku jeden měsíc jsou spojité průtoky  $Q_{ij}(t)$  na řešeném období nahrazeny vektorem  $Q_{ij}^T = (Q_{ij}^1, Q_{ij}^2, \dots, Q_{ij}^N)$ . Prvky vektoru jsou průměrné měsíční průtoky a jejich pořadí určuje horní index  $\tau=1,2,\dots, N$ , kde  $N$  je počet řešených časových kroků (měsíců).

### 3.2. Formulace úlohy optimálního rozvoje

Úlohu je možno formulovat jako nalezení množiny vektorů:

$$\underline{Q}_{z,j}^{\tau} = (Q_{z,j}^1, Q_{z,j}^2, \dots, Q_{z,j}^N), \quad \forall z \in Z; n_j \in U, \quad (2)$$

$$\underline{Q}_{i,j}^{\tau} = (Q_{i,j}^1, Q_{i,j}^2, \dots, Q_{i,j}^N), \quad \forall n_i \in U; n_j \in U, \quad (3)$$

$$\underline{Q}_{i,o}^{\tau} = (Q_{i,o}^1, Q_{i,o}^2, \dots, Q_{i,o}^N), \quad \forall o \in O; n_i \in U, \quad (4)$$

$$\underline{V}_i^{\tau} = (V_i^1, V_i^2, \dots, V_i^N), \quad \forall n_i \in U1, \quad (5)$$

které popisují tok vody orientovaným ohodnoceným grafem. Postupným seřazením všech prvků množiny vektorů (2) získáme vektor neznámých  $\underline{X}$ , který obsahuje všechny neznámé veličiny. Prvky vektoru  $\underline{X}$  musí vyhovovat omezujícím podmínkám typu rovnice:

- pro vrcholy vodních zdrojů:

$$\sum_{h_{z,j} \in C(z)} Q_{z,j}^{\tau} = Q_z^{\tau}; \quad \forall z \in Z, \quad (6)$$

- pro tok vrcholy grafu s akumulací, které popisuje základní rovnice nádrže upravená do tvaru:

$$\sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{i,j}^{\tau} - \sum_{h_{j,k} \in B(j)} Q_{j,k}^{\tau} - Z_j(V_j^{\tau}) + \sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{PO_{i,j}}^{\tau} = \frac{V_j^{\tau}}{\Delta t} - \frac{V_j^{\tau-1}}{\Delta t}, \quad \forall n_j \in U1, \quad (7)$$

- pro tok vrcholy grafu bez akumulace:

$$\sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{i,j}^{\tau} - \sum_{h_{j,k} \in B(j)} Q_{j,k}^{\tau} + \sum_{h_{i,j} \in A(j)} Q_{PO_{i,j}}^{\tau} = 0, \quad \forall n_j \in U2, \quad (8)$$

kde značí:

$Z_j(V_j^{\tau})$  ztrátový průtok z vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$\Delta t$  délka časového kroku  $\tau$ ,

$V_j^{\tau}$  objem vody ve vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{i,j}^{\tau}$  průtok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{i,k}^{\tau}$  průtok hranou  $h_{j,k}$  v časovém kroku  $\tau$ ,

$Q_{PO_{i,j}}^{\tau}$  podzemní přítok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,



$A(j)$	množinu všech hran $h_{i,j}$ , které předávají vodu $n_j$ ,
$B(j)$	množinu všech hran $h_{j,k}$ , kterými odtéka voda z vrcholu $\tau$ ,
$C(z)$	množinu všech hran $h_{z,j}$ , kterými přitéká voda z vrcholu do systému,
$Q_z^\tau$	hodnota přítok do vrcholu v časovém kroku $\tau$ ,
$Q_{z,j}^\tau$	průtok hranou $h_{z,j}$ v časovém kroku $\tau$ .

a omezujícím podmínkám typu nerovnosti, které plynou z ohodnocení grafu  $G(N, H)$ :

- pro průtok hranami: 
$$\hat{Q}_{i,j}^\tau \leq Q_{i,j}^\tau \leq \check{Q}_{i,j}^\tau, \quad \forall n_i \in U; n_j \in U; n_i \in Z, \quad (9)$$

- pro odběry: 
$$\hat{Q}_o^\tau \leq Q_{i,o}^\tau \leq \check{Q}_o^\tau, \quad \forall o \in O; n_i \in U, \quad (10)$$

- pro plnění nádrží: 
$$\hat{V}_j^\tau \leq V_j^\tau \leq \check{V}_j^\tau, \quad \forall n_j \in U1, \quad (11)$$

kde značí:

- $\check{Q}_{i,j}^\tau$  maximální průtok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $\hat{Q}_{i,j}^\tau$  minimální průtok hranou  $h_{i,j}$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $\check{Q}_o^\tau$  maximální odběr ve vrcholu  $n_o$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $Q_{i,o}^\tau$  odběr hranou  $h_{i,o}$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $\hat{Q}_o^\tau$  minimální odběr ve vrcholu  $n_o$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $\check{V}_j^\tau$  maximální objem vody ve vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $\hat{V}_j^\tau$  minimální objem vody ve vrcholu  $n_j$  v časovém kroku  $\tau$ ,
- $\hat{\phantom{x}}, \check{\phantom{x}}$  horní a dolní mez příslušného intervalu možného výskytu.

V každé variantě řešení úlohy optimálního rozvoje se kromě optimálního toku vody grafem  $G(N, H)$  také hledá současně i jedno nebo více neznámých ohodnocení grafu (například zásobní objem nové nádrže). Vektor neznámých  $\underline{X}$  je oproti předchozí úloze rozšířen o příslušná neznámá ohodnocení. Neznámá ohodnocení jsou hledána na intervalech přípustných hodnot, jejichž meze jsou označeny horním indexem MIN a MAX. Například pro neznámé ohodnocení z (11) platí:

$$V_j^{\text{MIN}} \leq \check{V}_j^\tau \leq V_j^{\text{MAX}}, \quad \forall n_j \in NU1, \quad (12)$$

kde značí:

- $NU1$  množinu nově navrhovaných uzlů řízení s akumulací,  
 $V_j^{MAX}$  maximálně možný objem vody v nádrži ve vrcholu  $n_j$ ,  
 $V_j^{MIN}$  minimálně možný objem vody v nádrži ve vrcholu  $n_j$ .

Obdobně je možno vymežit i další intervaly přípustných hodnot pro další neznámá ohodnocení z (9) a (10).

Aby úloha měla řešení, je třeba zadat počáteční a okrajové podmínky. Počáteční podmínka určuje počáteční plnění nádrže v časovém kroku  $\tau = 0$ . Okrajovými podmínkami jsou průtokové řady ve vstupních profilech systému a odpovídají pravé straně rovnice (6).

Prvky vektoru  $\underline{X}$  určují polohu bodu (hodnota vektoru  $\underline{X}$ ) ve vícerozměrném prostoru. Řešení rovnic (6), (7) a (8), při dodržení nerovností (9), (10), (11) má nekonečně mnoho řešení. Pro stanovení jednoznačného řešení je nutné definovat kritériální funkci  $\pi$ , která je funkcí hodnoty vektoru  $\underline{X}$ . Výsledným řešením je pak ta hodnota vektoru  $\underline{X}$ , pro kterou kritériální funkce dosahuje požadovaného extrému (maxima nebo minima). Tvar kritériální funkce závisí na řešeném účelu. Funkci je vhodné vyjádřit v aditivním tvaru. Pro řešený účel je možno kritériální funkci jednoduše vyjádřit pomocí hydrologické zabezpečení dodávky vody odběratelům vody a hydrologické zabezpečení ve vybraných vnitřních hranách grafu  $G(N, H)$ :

$$\left[ \pi = \sum_{\tau=1}^N \left( \sum_{\forall o \in O} (P_o [Q_{i,o}^{\tau} = \tilde{Q}_o^{\tau}] - P_o^N)^2 + \sum_{\forall h_{i,j} \in VH} (P_{i,j} [Q_{i,j}^{\tau} \geq \hat{Q}_{i,j}^{\tau}] - P_{i,j}^N)^2 \right) \right] \rightarrow MIN, \quad (13)$$

kde značí:

- $Q_{i,o}^{\tau}$  průměrné odebírané množství vody v časovém kroku  $\tau$ ,  
 $f_o (Q_{i,o}^{\tau})$  dílčí kritériální funkci přiřazenou odběrateli vody  $o$ .  
 $O$  množinu odběratelů, pro které je počítána zabezpečení,  
 $VH$  množinu vybraných vnitřních hran, ve kterých je počítána zabezpečení,  
 $P^N$  normativní (požadovaná) zabezpečení,  
 $P$  vypočítanou zabezpečení.

### 3.3. Metody řešení úlohy optimálního rozvoje

Matematický model úlohy optimálního rozvoje představuje optimalizační problém, ve kterém jsou omezující podmínky lineární a kritériální funkce nelineární. K řešení úloh je možné

použít přímé optimalizační metody nebo simulační model. Rozdíl mezi oběma modely je ve způsobu řešení (Starý, 2006).

Řešení úlohy optimálního rozvoje se provádí v případech, kdy struktura stávajícího systému přestane být dostačující a hledá se její nová podoba. Přesnějšího řešení úlohy optimálního rozvoje je docíleno při použití průtokových řad o dostatečné délce. Řešení je pak třeba provádět na velmi dlouhém období, zahrnujícím v reálných průtokových řadách desítky, v umělých pak stovky, tisíce až desetitisíce let. Pro řešení úloh optimálního rozvoje je proto vhodné použít simulační model.

### Simulační model

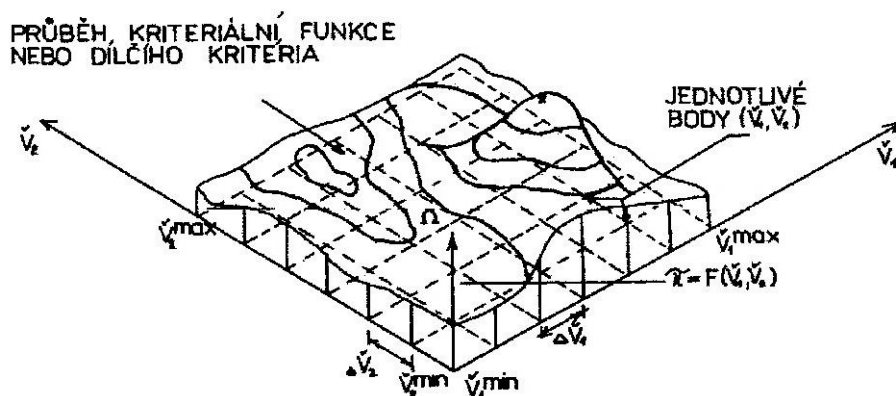
U simulačního modelu jsou omezující podmínky typu rovnice řešeny postupně po časových krocích  $\tau=1, 2, \dots, N$ , protože jsou zadána pravidla řízení odtoku vody z nádrží. Vektor neznámých  $\underline{X}$  je tedy vyčíslován postupně pro jednotlivé časové kroky  $\tau$  pomocí rovnic (6), (7) a (8).

Optimálního nalezení neznámých ohodnocení grafu (parametry) je dosaženo opakovaným řešením řady variant. Jednotlivé varianty se od sebe liší změnou hodnoty jednoho nebo více parametrů. Hledané parametry jsou vždy neznámou a jsou hledány pomocí optimalizačních metod, kdy hodnota kritériální funkce se získává z výsledků opakované simulace chování systému pro dané hodnoty parametrů. V práci jsou použity čtyři optimalizační (prohledávací) metody. Metoda mřížková, metoda Monte Carlo, modifikovaná gradientní metoda a metoda diferenciální evoluce.

### Mřížková metoda (MM)

Mřížková metoda je nejjednodušší optimalizační metoda tzv. jednotná mřížková metoda (klasický simulační model), kde jsou na přípustných intervalech voleny parametry s pevným krokem. Řešených variant je pak konečný počet, který je možno předem určit. Kombinace hodnot parametrů tak vytváří pravidelnou mřížku v prostoru  $\Omega$ . V simulačním modelu je třeba vyčerpát všechny možné kombinace hodnot parametrů, z nichž každá určuje jednu variantu řešení. Výhodou tohoto způsobu řešení je to, že je systematicky prohledávána celá oblast řešení, což umožňuje nalézt vždy globální extrém kritériální funkce. Nevýhodou je pak velký počet řešených variant. Přesnost závisí na velikosti kroku změn parametrů. Ve snaze snížit počet variant, se často řešení provádí nejdříve s většími kroky parametrů (na hrubé rozlišovací úrovni), což umožňuje přibližně vymezit oblast hledaného řešení. Následně se úloha na této

oblasti dořeší s jemnými kroky změn parametrů. Příklad užití mřížkové metody v simulačním modelu pro dva hledané parametry ( $\check{V}_1, \check{V}_2$ ) je na obr. 6.



**Obr. 6** Volba parametrů v klasickém simulačním modelu, převzato z (Starý, 2006).

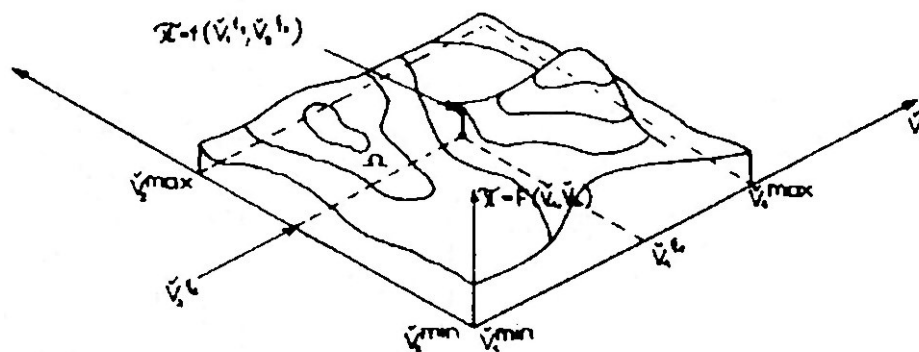
### Metoda Monte Carlo (MC)

Stochastická optimalizační metoda Monte Carlo je založena na zcela opačném přístupu než metoda mřížková, oblast přípustných intervalů parametrů je prohledávána náhodně – body na oblasti  $\Omega$  jsou určovány zcela náhodně. Příklad užití metody Monte Carlo je na obr. 7. Zde pro dva náhodně hledané parametry,  $(\check{V}_1^{\xi_1}, \check{V}_2^{\xi_2})$  na oblasti  $\Omega$  platí:

$$\check{V}_1^{\xi_1} = \check{V}_1^{MIN} + (\check{V}_1^{MAX} - \check{V}_1^{MIN}) * \xi_1, \quad (14)$$

$$\check{V}_2^{\xi_2} = \check{V}_2^{MIN} + (\check{V}_2^{MAX} - \check{V}_2^{MIN}) * \xi_2, \quad (15)$$

kde  $\xi_1$  a  $\xi_2$  jsou pseudonáhodná čísla náhodně generovaná z intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$ . Počet řešených variant je možno opět snížit řešením na různých rozlišovacích úrovních, podobně jako u mřížkové metody.



**Obr. 7** Pseudonáhodné vzorkování parametrů v simulačním modelu, převzato z (Stary, 2006).

### Modifikovaná gradientní metoda (MGM)

Modifikovaná gradientní metoda je vytvořena v rámci disertační práce (Menšík, 2012). Metoda vychází z principu metod gradientních a je založena na následujícím algoritmu. Pomocí mřížkové metody, hledající řešení na hrubé rozlišovací úrovni, je nalezena oblast předpokládaného optimálního řešení (globálního extrému). Okolí předpokládaného extrému je následně prohledáváno. Hodnota každého  $j$ -tého hledaného parametru je postupně zpřesňována. Smyslem metody je, aby zpřesňování (změna) všech hledaných parametrů probíhalo najednou v jednom kroku. Každý krok, ve kterém proběhne zpřesnění parametrů je možno rozdělit na dvě části: lineární predikce a zpětná korekce. Podrobný popis optimalizační metody je popsán v uvedené disertační práci.

### Diferenciální evoluce (DE)

Diferenciální evoluce je stochastická optimalizační metoda a její algoritmus je evolučního typu. Hlavní rozdíl diferenciální evoluce od většiny ostatních genetických algoritmů je v tom, že tvorba potomků se provádí pomocí čtyř rodičů a ne pouze pomocí dvou. Cílem diferenciální evoluce je v cyklech zvaných „generace“ vyšlechtit co nejlepší populaci (množinu) jedinců ve smyslu hodnot kritériální funkce (Zelinka, 2002).

## 3.4. Ztráty vody z nádrží

Ztráty vody tvoří nedílnou součást vodohospodářského řešení zásobní funkce soustavy nádrží. Neboť v ojedinělých případech mohou vzniknout takové poruchy, kdy nádrž nestačí pokrývat své ztráty a tudíž i svou zásobní funkci.

V rovnici (16) jsou uvedeny celkové ztráty vody z nádrže členem  $Z_j(V_j^T)$ . Tyto ztráty závisí především na výšce hladiny vody, která je funkcí okamžitého plnění nádrže.  $V_j^T$ . Celkové ztráty vody z nádrže je možno rozdělit na několik typů a to: ztráty vody výparem z volné vodní hladiny  $Z_j^V$ , ztráty vody průsakem  $Z_j^P$  a to buď tělesem hráze, nebo průsak dnem. Třetí typ jsou ztráty vody způsobné netěsnostmi uzávěrů  $Z_j^{NU}$ .

$$Z_j(V_j^T) = Z_j^V + Z_j^P + Z_j^{NU} \quad (16)$$

### 3.4.1. Zjednodušený výpočet ztrát vody ze stávajících nádrží

V práci je při řešení uvažováno se zjednodušeným výpočtem ztrát vody z nádrží. Výhoda zjednodušeného výpočtu ztrát spočívá v menší časové náročnosti na provedení výpočtu nebo je zjednodušený výpočet vhodný v případě, když nemáme o vodním díle dostatek potřebných informací (Menšík, 2012). Výpočet je zjednodušen tak, že na počátku stanovení ztrátových členů je určeno střední plnění zásobní objemu nádrže ve vrcholu  $n_j$ :

$$V'_{j,z} = 0,66 * V_{j,z}, \quad (17)$$

kde značí:

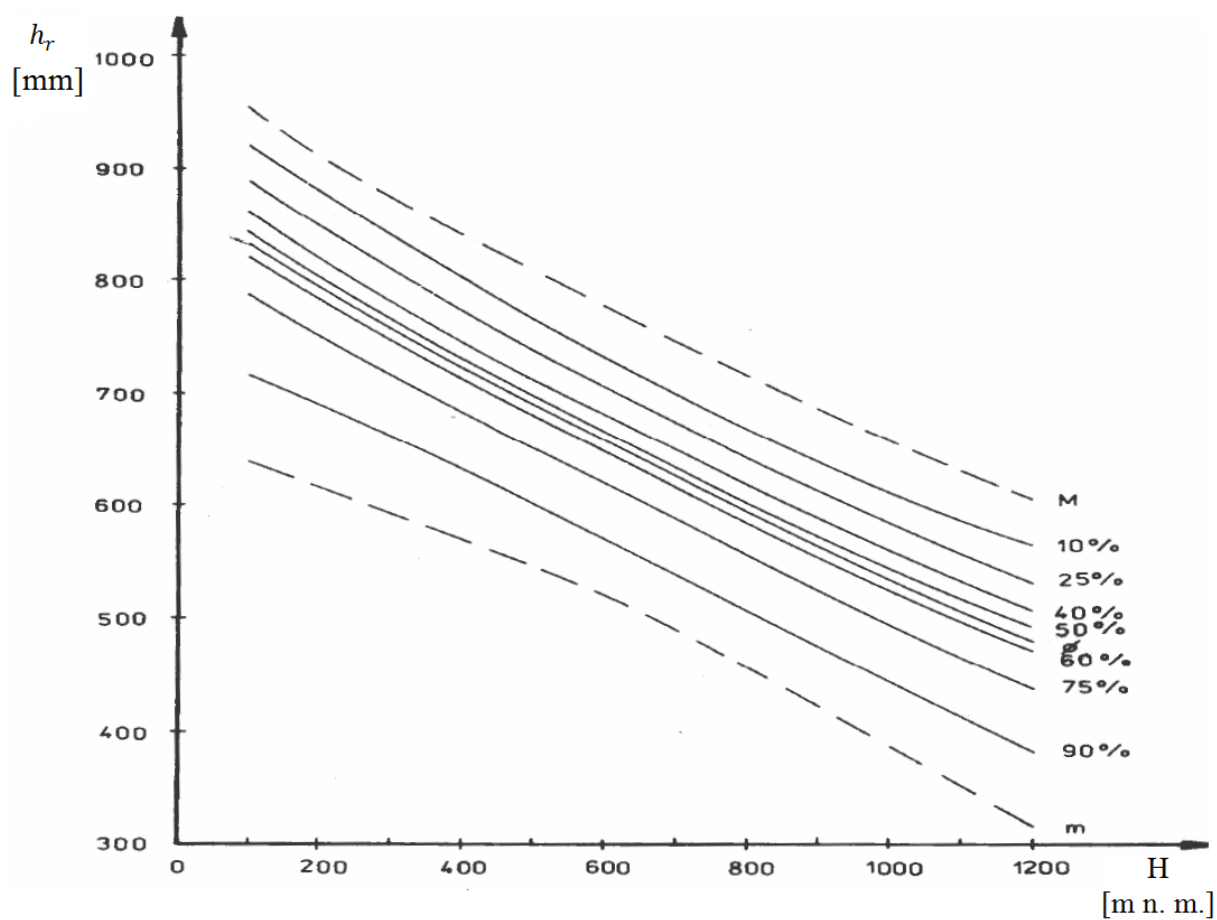
$V_{j,z}$  velikost zásobního objemu nádrže ve vrcholu  $n_j$ .

Střednímu plnění zásobního objemu odpovídá střední nadmořská výška vodní hladiny  $H_j$  a střední plocha vodní hladiny  $F_j$ . Ztráty vody z nádrží jsou pak v každém řešeném kroku konstantní.

#### Ztráta výparem z volné vodní hladiny

Výpar z vodní hladiny nádrže závisí na teplotě, na napětí par ve vzduchu, na rychlosti větru a na velikosti plochy hladiny. Z menších vodních nádrží, jež se rychleji prohřejí, je výpar z hladiny větší než na velkých vodních plochách.

Úhrn výparu z nádrže za rok  $h_{jr}$  ve vrcholu  $n_j$  je závislý na stupni zabezpečení výparu a na nadmořské výšce vodní hladiny – viz obr. 8.



**Obr. 8** Úhrn ročního výparu v závislosti na nadmořské výšce a stupni zabezpečení.

Procentuální rozdělení úhrnu ročního výparu na úhrn měsíčního výparu  $h_{jm}$  je uvedeno v tab. 4. Pomocí úhrnu měsíčního výparu a plochy vodní hladiny  $F_j$  je možné určit ztrátový odtok způsobený výparem  $Z_j^V$ .

**Tab. 4** Procentuální rozdělení ročního výparu na každý měsíc (%).

Měsíc	Průměr	Extrémní rok		Absolutní měsíční	
		Suchý	Vlhký	Maximum	Minimum
1	1	1	1	6	0
2	2	1	1	8	0
3	6	5	5	8	1
4	9	9	11	12	5
5	12	14	11	19	7
6	14	13	16	18	10
7	16	14	15	20	12
8	15	16	12	22	9
9	11	14	11	16	7
10	7	7	9	12	4
11	5	4	7	9	1
12	2	2	1	5	1

### Ztráta průsakem tělesa hráze

Ztráta průsakem může být u některých nádrží významnější než ztráta výparem. Průsak vody  $U_j$  tělesem hráze ve vrcholu  $n_j$  je možno orientačně vypočítat:

$$U_j = K_j * I_j * A_j, \quad (18)$$

kde značí:

$K_j$  filtrační koeficient ve vrcholu  $n_j$ ,

$I_j$  hydraulický spád ve vrcholu  $n_j$ ,

$A_j$  průtočnou plochu ve vrcholu  $n_j$ .

Také je možné ztrátu průsakem hráze odhadnout, díky zkušenostem s nádržemi v podobných klimatických podmínkách. Je třeba brát v úvahu to, že v počátku provozu hráze je průsak tělesem největší a postupem času se snižuje.

### Ztráta netěsností uzávěrů

Ztráta vody netěsností uzávěru  $Z_j^{NU}$  je dána výrobcem zařízení, nebo se vyčte z příslušné literatury.



### 3.4.2. Zjednodušený výpočet ztrát vody z navrhovaných nádrží

Výše uvedený zjednodušený výpočet ztrát vody z nádrží je aplikovatelný pouze na již existující nádrže. U úloh optimálního rozvoje systému zásobení vodou, ve kterých hledáme optimální velikosti zásobních objemů (navrhujeme nové nádrže) je nutné ztrátový odtok každé z navrhovaných nádrží vyjádřit funkční závislostí  $Z_j = f(0.66\check{V}_j^\tau)$ . Průběh funkční závislosti je pro snadnější aplikaci nutné lineárně aproximovat.

### 3.5. Účinek vlivu mezipovodí

Při řešení toku vody systémem je možno zohlednit účinek vlivu mezipovodí. Pomocí členu  $Q_{PO_{i,j}}^\tau$  v rovnicích (7) a (8) je možno zjednodušeně při řešení uvažovat s podzemním přítokem. Velikost podzemního přítoku je stanovena z řady neovlivněných průměrných měsíčních průtoků, která odpovídá vybranému profilu systému (narůstající průtok směrem po toku). V každém časovém kroku řešení  $\tau$  je pro každou hranu grafu  $h_{i,j} \in H$  a její délku  $L_{i,j}$  stanovena velikost podzemního přítoku  $Q_{PO_{i,j}}^\tau$ , který je přímo úměrný délce hrany. Tímto zjednodušeným způsobem jsou zohledněny i ostatní přítoky do systému, například jiné drobné toky (Menšík, 2012).

### 3.6. Program SOMVS

K sestavení simulačního modelu vodohospodářské soustavy a k vlastnímu nalezení optimální velikosti zásobního objemu navrhované nádrže Skryje je použit program SOMVS (Menšík, Starý, 2012). Program SOMVS – Simulační a optimalizační model vodohospodářské soustavy je vytvořen v rámci disertační práce (Menšík, 2012). Program umožňuje provést návrh a přehodnocení velikosti zásobních objemů nádrží spolupracujících v rámci vodohospodářské soustavy. Program je možno použít pro optimalizované řízení zásobní funkce vodohospodářské soustavy.

Velikosti zásobních objemů jednotlivých nádrží ve vodohospodářské soustavě jsou stanoveny pomocí simulačního modelu v kombinaci s nelineární optimalizací. V řešení je možno uvažovat se ztrátami vody z nádrží, s podzemním odtokem vody z povodí a s řízením. Řízení systému zásobení vodou je založeno na teorii stavu nádrží. Teorie vychází z dispečerských grafů.

Na základě předpovězených průtoků program umožňuje najít optimální režim odtoku vody z nádrží. Optimální režim odtoku vody z nádrží je hledán pomocí přímé optimalizační metody.

Program je napsán v programovacím jazyce FORTRAN. Grafické uživatelské rozhraní je vytvořeno ve vývojovém prostředí Microsoft Visual Studio 2008 Express Edition za použití programovacího jazyka Microsoft Visual C#. Grafické uživatelské rozhraním uživateli umožní jednoduše zadávat vstupní hodnoty, spouštět výpočet a přehledně zobrazovat výstupní hodnoty.

Program je možno nainstalovat na počítač s 32bitovým i 64bitovým procesorem a s operačním systémem Microsoft Windows (verze XP až 7). Samotná instalace je provedena pomocí klasického instalátoru. Pro spuštění programu musí být v počítači nainstalovaný balík knihoven Microsoft .NET Framework verze 3.5 nebo novější.

## 4. Praktická aplikace

K provedení praktické aplikace je vybrán subsystém nádrží Vír, Brno a Skryje. Vír a Brno jsou nádrže stávající a nádrž Skryje je nádrž navrhovanou. Pro řešení je vytvořena hypotetická situace, kdy je zvolen takový požadovaný nalepšený průtok pod nádrží Brno, který vyvolá napjatou hydrologickou situaci v řešeném systému. Vytvořená situace vyžaduje doplnění stávajících nádrží Vír a Brno o další akumulací prostor (zásobní objem nádrže). Zásobní objem je hledán v profilu Skryje, na vodním toku Bobrůvka.

Technické údaje ke stávajícím nádržím Vír a Brno byly získány z internetových stránek Povodí Moravy, s. p. (<http://www.pmo.cz>). Základní technické informace k navrhované nádrži Skryje jsou převzaty ze směrného vodohospodářského plánu ČSR.

Uvažovaný subsystém má dva přítoky (zdroje). Prvním přítokem je vodní tok Svatka a druhým přítokem je vodní tok Bobrůvka. Reálné průtokové řady průměrných měsíčních průtoků byly poskytnuty ČHMÚ Pobočka Brno. Průtokové řady byly získány měřením v měrném profilu Dalečín (Svatka) a měřením v měrném profilu (MP) Skryje (Bobrůvka). Délka průtokových řad je 56 let a jsou z období let 1953–2009.

Výsledkem vodohospodářské řešení zásobní funkce uvažovaného subsystému nádrží je nalezená optimální velikost zásobního objemu nádrže Skryje. Vodohospodářské řešení je provedeno opakovaně pro různé zabezpečení průměrného ročního výparu. Na rozdílných hodnotách optimální velikosti zásobního objemu nádrže Skryje je pozorován velikost účinku ztrát vody výparem z vodní hladiny nádrže.

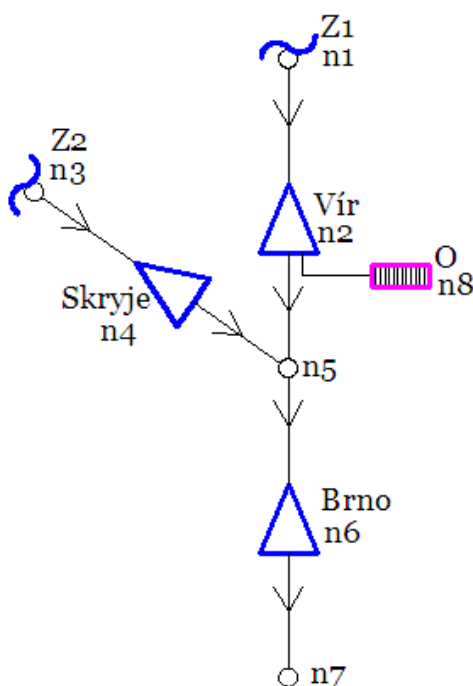
K řešení je použit simulační model, který je automatizovaně sestaven v programu SOMVS. Optimální velikost navrhovaného zásobního objemu nádrže Skryje je v simulačním modelu nalezena opakovaným řešením řady variant. Jednotlivé varianty se od sebe liší změnou hodnoty parametru (neznámá velikost zásobního objemu nádrže Skryje).

Před provedením řešení je prvně nutné uvažovaný subsystém nádrží schematizován pomocí orientovaného ohodnoceného grafu – podkapitola 4.1. V následující podkapitole 4.2 jsou stanoveny všechny vstupní parametry vstupující do výpočtu ztrát vody z nádrží. V podkapitole 4.3 jsou omezující podmínky typu rovnic a nerovností upraveny do tvaru popisujícího uvažovaný subsystém nádrží Vír, Skryje a Brno. Podkapitola 4.4 popisuje postup práce s programem SOMVS – vytvoření všech vstupních hodnot do simulačního modelu. V podkapitole 4.5 jsou v tabulkách uvedeny nalezené optimální velikosti zásobních objemů nádrže Skryje. Optimální velikosti zásobních objemů jsou nalezeny všemi optimalizačními

metodami (metoda mřížová, metoda Monte Carlo, modifikovaná gradientní metoda, metoda diferenciální evoluce) a pro různé zabezpečení výparu.

#### 4.1. Schematizace subsystému nádrží

Uvažovaný subsystém nádrží je schematizován pomocí ohodnoceného orientovaného grafu obr. 9. Je tvořen množinou hran představující toky a to Svratku a Bobrůvku, dále vrcholy bez akumulace vody což jsou přítoky do vodohospodářské soustavy a vrcholy s akumulací vody, které zde představují nádrže Vír, Skryje a Brno. V grafu je také znázorněn jediný uvažovaný odběr z Vírské nádrže.



**Obr. 9** Orientovaný graf pro uvažovaný subsystém nádrží.

Kódová čísla definující vybraný subsystém zásobení vodou a délky hran grafu jsou zobrazeny v tab. 5. Pomocí kódových čísel je do programu vložena konfigurace uvažovaného subsystému nádrží. Délky hran grafu jsou odměřeny z mapy a umožňují při řešení zohlednit účinek mezipovodí.

**Tab. 5** Kódová čísla definující subsystém zásobení vodou a délky hran grafu.

Číslo počátečního vrcholu $i$	Číslo koncového vrcholu $j$	Délka hrany $L_{i,j}$ [m]
1	2	500
2	5	34100
2	8	500
3	4	500
4	5	11700
5	6	17800
6	7	500

V tab. 6 jsou uvedeny minimální, nalepšené a neškodné průtoky v hranách grafu pod jednotlivými nádržemi.

**Tab. 6** Minimální, nalepšené a neškodné průtoky v hranách grafu pod jednotlivými nádržemi.

	Vír	Brno	Skryje
$Q_{\text{MIN}}$ [m <sup>3</sup> /s]	0,53	1,37	0,15
$Q_{\text{P}}$ [m <sup>3</sup> /s]	0,65	3,00	0,95
$Q_{\text{NE}}$ [m <sup>3</sup> /s]	55,00	155,00	40,00

Minimální průtoky odpovídají hodnotám minimálních zůstatkových průtoků v příslušném toku. Neškodné průtoky odpovídají kapacitě koryta pod nádrží. Minimální a neškodné průtoky vycházejí z údajů uvedených na internetových stránkách Povodí Moravy s. p..

Hodnota nalepšeného odtoku z nádrže Vír vychází z Manipulačního řádu VD Vír I. Nalepšený odtok z nádrže Brno je podle Manipulačního řádu VD Brno roven hodnotě 2,4 m<sup>3</sup>/s. Tato hodnota je navýšena na hodnotu 3,0 m<sup>3</sup>/s. Fiktivní navýšení nalepšeného odtoku z nádrže Brno je kompenzováno zásobním objemem navrhované nádrže Skryje. Nalepšený odtok z nádrže Skryje vyplývá z nutnosti navýšit přítok vody do nádrže Brno.

S odběrem vody pro vodárenské účely je uvažováno pouze u nádrže Vír. Jedná se o vodárenský odběr pro skupinové vodovody Bystřice nad Pernštejnem, Žďár nad Sázavou a vodárenský odběr pro Vířský oblastní vodovod. Hodnoty průměrné měsíčních odběrů jsou uvedeny v tab. 7. Hodnoty vycházejí z údajů uvedených v Manipulačním řádu VD Vír.

**Tab. 7** Průměrné měsíční odběry z nádrže Vír v  $m^3/s$ .

Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

Zabezpečení hrany odběratele  $h_{2,8}$  je 100 %. U všech nádrží v subsystému je předpokládáno, že spadají do třídy významnosti A. Zabezpečení hran grafu  $h_{2,5}, h_{4,5}, h_{6,7}$  vycházejících z nádrží Vír, Skryje, Brno je proto 95,5 %.

Maximální, minimální a počáteční objemy vody ve stávajících nádržích jsou uvedeny v tab. 8.

**Tab. 8** Maximální, minimální a počáteční objemy stávajících nádrží.

	Vír $j = 2$	Brno $j = 6$
$\hat{V}_j^r [m^3]$	3800000	2080000
$\check{V}_j^r [m^3]$	47860000	15280000
$V_j^0 [m^3]$	47860000	15280000

Zásobní objem navrhované nádrže Skryje je hledán v intervalu neznámého ohodnocení  $\langle V_2^{\text{MIN}} = 1500000 m^3; V_2^{\text{MAX}} = 28000000 m^3 \rangle$ .

#### 4.2. Parametry ztrát vody z nádrží

Při zjednodušeném výpočtu ztrát se pro stávající nádrže parametry ztrát vody průsakem a netěsností uzávěrů vyjadřují pomocí paušálních hodnot. Paušální hodnoty ztrát pro stávající nádrže jsou uvedeny v tab. 9.

**Tab. 9** Paušální hodnoty ztrát pro stávající nádrže.

	<b>Vír <math>j = 2</math></b>	<b>Brno <math>j = 6</math></b>
<b>Ztráty průsakem [l/s]</b>	0,20	0,35
<b>Ztráty netěsností uzávěru [l/s]</b>	0,10	0,30

Pro určení ztrát vody výparem je u stávajících nádrží nutná znalost nadmořské výšky hladiny vody vztažené ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže a plochu vodní hladiny vztaženou ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže. Uvedené údaje jsou pro stávající nádrže uvedeny v tab. 10.

**Tab. 10** Hodnoty pro stanovení ztrát vody výparem pro stávající nádrže.

	<b>Vír <math>j = 2</math></b>	<b>Brno <math>j = 6</math></b>
<b>Nadmořská výška hladiny vztažená ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže [m n. m.]</b>	455,42	226,74
<b>Plocha vodní hladiny vztažená ke střednímu plnění zásobního objemu nádrže [m<sup>2</sup>]</b>	1412720	1683185

U navrhované nádrže Skryje jsou celkové ztráty vody (výparem, průsakem, netěsností uzávěrů) vyjádřeny funkční závislostí  $Z_4 = f(0,66 \cdot \check{V}_4^{\tau})$ . Funkční vyjádření je nutné z důvodu neznámého zásobního objemu, z kterého se stanovuje středního plnění vody v nádrži. Průběh závislosti je lineárně aproximován. K aproximaci je použito pěti bodů. Konkrétně body odpovídají:  $0,5 \cdot V_2^{\text{MIN}}$ ;  $0,25 \cdot V_2^{\text{MAX}}$ ;  $0,5 \cdot V_2^{\text{MAX}}$ ;  $0,75 \cdot V_2^{\text{MAX}}$  a  $1,5 \cdot V_2^{\text{MAX}}$ . Ke stanovení celkového ročního ztrátového množství odpovídajícímu zvolenému objemu vody v nádrži Skryje je nutná znalost čáry zatopených ploch a objemů příslušné nádrže. V tab. 11 jsou uvedeny souřadnice zatopených ploch a objemů navrhované nádrže Skryje. Tyto hodnoty jsou zjištěny z digitálního modelu terénu.

**Tab. 11** Souřadnice bodů batygrafických čar nádrže Skryje ( $j=4$ ).

$H_j$ [m n. m.]	$F_j$ [m <sup>2</sup> ]	$V_j$ [m <sup>3</sup> ]
320,60	0	0
324,00	12486	18147
328,00	89219	188594
332,00	159905	699882
336,00	244157	1486978
340,00	322193	2620872
344,00	414939	4084014
348,00	530899	5968544
352,00	675663	8366892
356,00	799933	11313395
360,00	933687	14776799
364,00	1077724	18792698
368,00	1224855	23400015
372,00	1382338	28613402
374,00	1460041	31455781

Symbolika použitá v tab. 11 značí:

- $H_j$  nadmořskou výšku,  
 $F_j$  plochu hladiny při dané nadmořské výšce v nádrži,  
 $V_j$  objem nádrže při dané nadmořské výšce v nádrži.

K určení celkového ročního ztrátového množství průsakem  $Z_j^P$  a celkové ročního ztrátového množství netěsností uzávěrů  $Z_j^{NU}$  je nutná znalost závislosti ztrát průsakem a ztrát netěsností uzávěrů na nadmořské výšce. Souřadnice bodů jednotlivých závislostí jsou zobrazeny v tab. 12.



**Tab. 12** Souřadnice bodů ztrát průsakem a netěsností uzávěrů na nadmořské výšce pro nádrž Skryje ( $j=4$ ).

$H_j$ [m n. m.]	$Z_j^P$ [l/s]	$Z_j^{NU}$ [l/s]
320,6	0,000	0,000
324	0,020	0,144
328	0,040	0,210
332	0,090	0,260
336	0,250	0,301
340	0,400	0,338
344	0,550	0,371
348	0,700	0,401
352	0,900	0,429
356	1,100	0,456
360	1,350	0,481
364	1,550	0,500

Symbolika použitá v tab. 12 značí:

$Z_j^P$  ztrátu průsakem při dané nadmořské výšce v nádrži,

$Z_j^{NU}$  ztrátu netěsností uzávěrů při dané nadmořské výšce v nádrži.

U navrhované nádrže Skryje zvolený průběh ztrát průsakem vychází z předpokladu, že ztrátový odtok s výškou plnění vody v nádrži roste podobně jako u nádrže Vír a Brno. Průběhy závislosti u nádrží Vír a Brno jsou získány z výsledků měření průsaku na vodních dílech. Měření provádí technickobezpečnostní dohled Povodí Moravy. Maximální hodnota ztrátového odtoku pro nadmořskou výšku 374 m n. m. odpovídá průsaku na zemní hrázi 2 l/s – viz tab. 13.

**Tab. 13** Průsaky na významných přehradách v České republice.

Typ přehrady	Počet přehrad s průsakem [l/s]		
	pod 5	5 – 20	přes 20
zemní	17	6	2
kamenité se zemním těsněním	4	1	1
zemní a kamenité s plášťovým těsněním (železobetonovým, asfaltobetonovým, fólií PVC)	2	2	1
gravitační betonové a zděné z lomového zdiva	až na výjimky pod 0,15 l/s na 1000 m <sup>2</sup> omočené plochy, čili jen výjimečně přes 2 l/s		

U stávajících nádrží Vír a Brno nejsou ztráty netěsností uzávěrů měřeny. Maximální hodnoty ztrátového odtoku jsou získány z odborného odhadu Povodí Moravy. U navrhované nádrže Skryje je maximální hodnota ztrátového odtoku stanovena obdobně jako u nádrže Brno, protože je předpokládán stejný typ uzávěru. Souřadnice bodů ztrát netěsností uzávěrů na nadmořské výšce zobrazeny v tab. 12 jsou stanoveny na základě předpokladu, že ztrátový odtok s výškou plnění vody v nádrži parabolicky roste.

Pro vybraných pět bodů ( $0,5 \cdot V_2^{\text{MIN}}$ ;  $0,25 \cdot V_2^{\text{MAX}}$ ;  $0,5 \cdot V_2^{\text{MAX}}$ ;  $0,75 \cdot V_2^{\text{MAX}}$  a  $1,5 \cdot V_2^{\text{MAX}}$ ) je interpolací hodnot uvedených v tab. 11 stanovena nadmořská výška a plocha vodní hladiny odpovídající vybranému objemu. Pro každou nadmořskou výšku jsou interpolací hodnot uvedených v tab. 12 stanoveny celkové roční ztráty průsakem a celkové roční ztráty netěsností uzávěrů. Hodnoty celkových ročních ztrát jsou uvedeny v tab. 14.

**Tab. 14** Hodnoty celkových ročních ztrát průsakem a netěsností uzávěrů.

Nadmořská výška [m n. m.]	330,40	345,10	353,20	358,90	371,30
Netěsnost uzávěrů [m <sup>3</sup> /r]	1 422	16 370	27 172	36 645	57 937
Průsak hrází [m <sup>3</sup> /r]	6 766	10 717	12 336	13 379	15 408
Součet ztrát [m <sup>3</sup> /r]	8188	27087	39508	50023	73345

Za účelem stanovení celkového ročního množství ztrát výparem pro vybrané stupně zabezpečení použít graf na obr. 8. Průběhy závislosti v grafu jsou pomocí regresních křivek proloženy. K proložení je použit program Excel. Následně je pro každý z pěti zvolených bodů (objemů) stanovena hodnota celkové roční ztráty výparem. Velikost výparu je spočítána:

$$Z_4^V = P_4 \cdot \frac{h_V}{1000}, \quad (19)$$

kde značí:

$Z_4^V$  ztrátu výparem při dané nadmořské výšce hladiny [m<sup>3</sup>/rok],

$P_4$  plochu hladiny při dané nadmořské výšce [m<sup>2</sup>],

$h_V$  úhrn výparu při dané nadmořské výšce hladiny [mm].

Nyní je možno stanovit hodnotu celkových ročních ztrát při dané stupně zabezpečení výparu a to dle vzorce:

$$Z_4 = Z_4^V + Z_4^P + Z_4^{NU}, \quad (20)$$

kde značí:

$Z_4^V$  ztrátu výparem při dané nadmořské výšce hladiny [m<sup>3</sup>/rok],

$Z_4^P$  ztrátu průsakem při dané nadmořské výšce hladiny [ $\text{m}^3/\text{rok}$ ],

$Z_4^{NU}$  ztrátu netěsností uzávěrů při dané nadmořské výšce hladiny [ $\text{m}^3/\text{rok}$ ].

Závislosti celkových ročních ztrát nádrže Skryje na středním plnění zásobního objemu pro vybrané stupně zabezpečení výparu jsou uvedeny v tab. 15 až tab. 23.

**Tab. 15** Minimální zabezpečení.

Vypočtené hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \check{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	93 373	315 420	496 714	625 161	936 936

**Tab. 16** Zabezpečení výparu 10%.

Vypočtené hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \check{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	97 320	328 857	518 088	652 109	977 596

**Tab. 17** Zabezpečení výparu 25%.

Vypočtené hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \check{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	105 273	354 939	558 716	702 556	1 051 196

**Tab. 18** Zabezpečení výparu 40%.

Vypočtené hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \check{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	109 221	368 377	580 090	729 504	1 091 856

**Tab. 19** Zabezpečenosť výparu 50%.

Vypočítané hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \tilde{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	110 536	372 856	587 215	738 486	1 105 409

**Tab. 20** Zabezpečenosť výparu 60%.

Vypočítané hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \tilde{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	111 852	377 335	594 340	747 469	1 118 963

**Tab. 21** Zabezpečenosť výparu 75%.

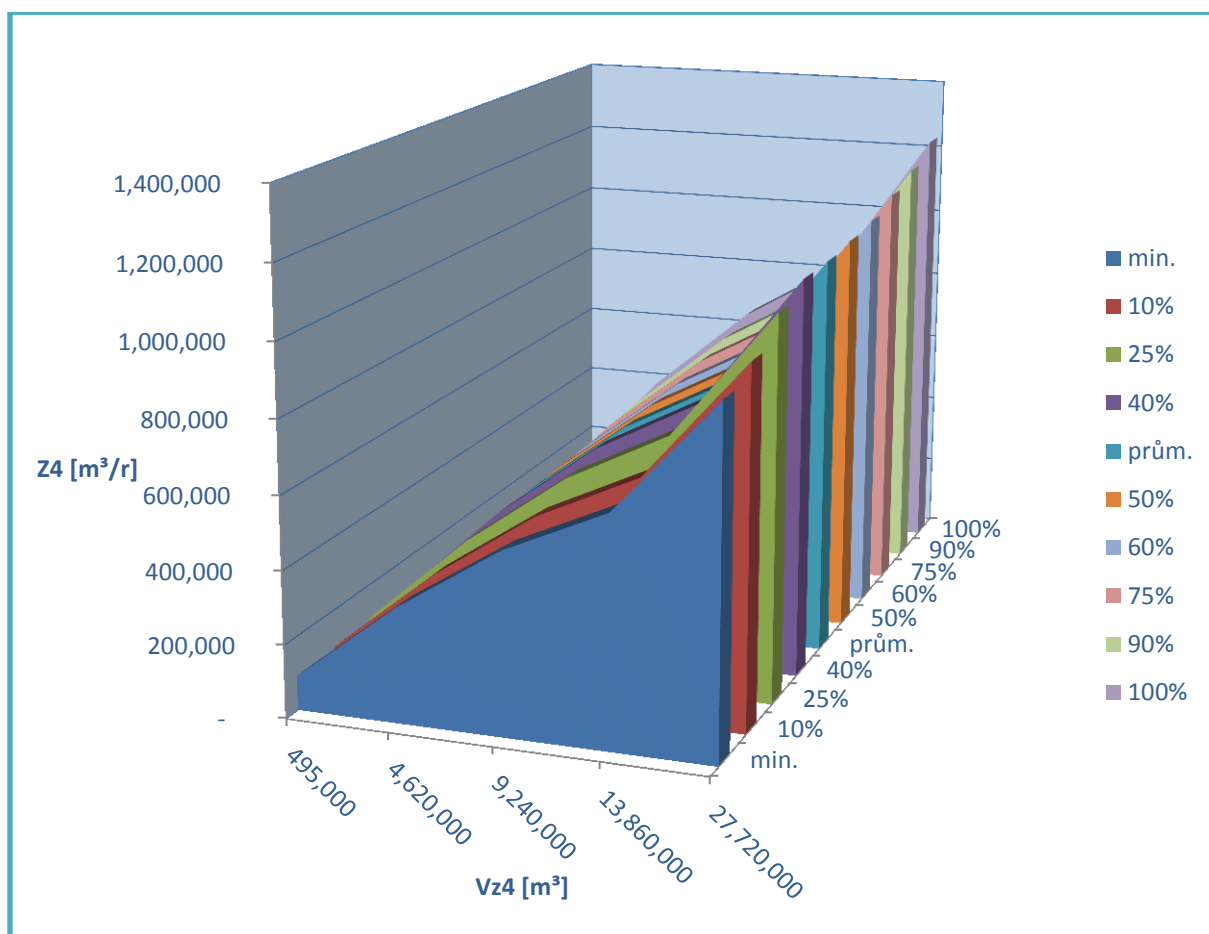
Vypočítané hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \tilde{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	115 142	388 533	612 152	769 927	1 152 847

**Tab. 22** Zabezpečenosť výparu 90%.

Vypočítané hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \tilde{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	118 431	399 738	629 964	792 384	1 186 731

**Tab. 23** Zabezpečenosť výparu 100%.

Vypočítané hodnoty celkových ztrát z nádrže Skryje					
	$0,5 V_4^{\text{MIN}}$	$0,25 V_4^{\text{MAX}}$	$0,5 V_4^{\text{MAX}}$	$0,75 V_4^{\text{MAX}}$	$1,5 V_4^{\text{MAX}}$
$0,66 \cdot \tilde{V}_4^{\tau} [\text{m}^3]$	495 000	4 620 000	9 240 000	13 860 000	27 720 000
$Z_4 [\text{m}^3/\text{rok}]$	122 778	415 196	655 127	824 638	1 237 059



**Obr. 10** Graf závislosti celkových ztrát vody z nádrže Skryje na objemu pro vybrané stupně zabezpečení výparu.

#### 4.3. Řídící rovnice řešeného subsystému nádrží

Pro řešený subsystém nádrží jsou omezující podmínky typu rovnice a omezující podmínky typu nerovností přepsány do následujícího tvaru:

##### Omezující podmínky typu rovnice:

a) Pro zdroje:

$$Q_{z\,1,2}^{\tau} = Q_1^{\tau} \quad (21)$$

$$Q_{z\,3,4}^{\tau} = Q_3^{\tau} \quad (22)$$

b) Pro vrcholy bez akumulace:

$$Q_{2,5}^{\tau} + Q_{4,5}^{\tau} + Q_{5,6}^{\tau} = 0 \quad (23)$$

c) Pro nádrže:

$$Q_{1,2}^{\tau} - Q_{2,3}^{\tau} - Q_{2,8}^{\tau} - z_2(V_2^{\tau}) = \frac{V_2^{\tau}}{\Delta t} - \frac{V_2^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (24)$$

$$Q_{3,4}^{\tau} - Q_{4,5}^{\tau} - z_4(V_4^{\tau}) = \frac{V_4^{\tau}}{\Delta t} - \frac{V_4^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (25)$$

$$Q_{5,6}^{\tau} - Q_{6,7}^{\tau} - z_6(V_6^{\tau}) = \frac{V_6^{\tau}}{\Delta t} - \frac{V_6^{\tau-1}}{\Delta t} \quad (26)$$

### Omezující podmínky typu nerovnosti:

a) Pro průtok vody vnitřními hranami grafu:

$$\hat{Q}_{2,5}^{\tau} \leq Q_{2,5}^{\tau} \leq \check{Q}_{2,5}^{\tau} \quad (27)$$

$$\hat{Q}_{4,5}^{\tau} \leq Q_{4,5}^{\tau} \leq \check{Q}_{4,5}^{\tau} \quad (28)$$

$$\hat{Q}_{5,6}^{\tau} \leq Q_{5,6}^{\tau} \leq \check{Q}_{5,6}^{\tau} \quad (29)$$

$$\hat{Q}_{5,7}^{\tau} \leq Q_{5,7}^{\tau} \leq \check{Q}_{5,7}^{\tau} \quad (30)$$

b) Pro nádrže:

$$\hat{V}_2^{\tau} \leq V_2^{\tau} \leq \check{V}_2^{\tau} \quad (31)$$

$$\hat{V}_4^{\tau} \leq V_4^{\tau} \leq \check{V}_4^{\tau} \quad (32)$$

$$\hat{V}_6^{\tau} \leq V_6^{\tau} \leq \check{V}_6^{\tau} \quad (33)$$

c) Pro odběry:

$$\hat{Q}_8^{\tau} \leq Q_{2,8}^{\tau} \leq \check{Q}_8^{\tau} \quad (34)$$

c) Pro neznámé ohodnocení:

$$V_4^{\text{MIN}} \leq \check{V}_4^{\tau} \leq V_4^{\text{MAX}} \quad (35)$$

Kriteriální funkce vychází z řešené úlohy a je obecně vyjádřena pomocí rovnice (36).

$$\left[ \pi = \sum_{\tau=1}^N \left( (P_8[Q_{2,8}^{\tau} = \check{Q}_8^{\tau}] - 100)^2 + (P_{2,5}[Q_{2,5}^{\tau} \geq \hat{Q}_{2,5}^{\tau}] - 99,5)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. (P_{4,5}[Q_{4,5}^{\tau} \geq \hat{Q}_{4,5}^{\tau}] - 99,5)^2 + (P_{6,7}[Q_{6,7}^{\tau} \geq \hat{Q}_{6,7}^{\tau}] - 99,5)^2 \right) \right] \rightarrow MIN., \quad (36)$$

#### 4.4. Způsob řešení

K sestavení simulačního modelu řešeného subsystému nádrží Vír, Skryje a Brno je použit program SOMVS. V grafickém uživatelském rozhraní programu je vytvořen projekt pomocí, kterého jsou do programu vkládána vstupní data potřebná k sestavení simulačního modelu.

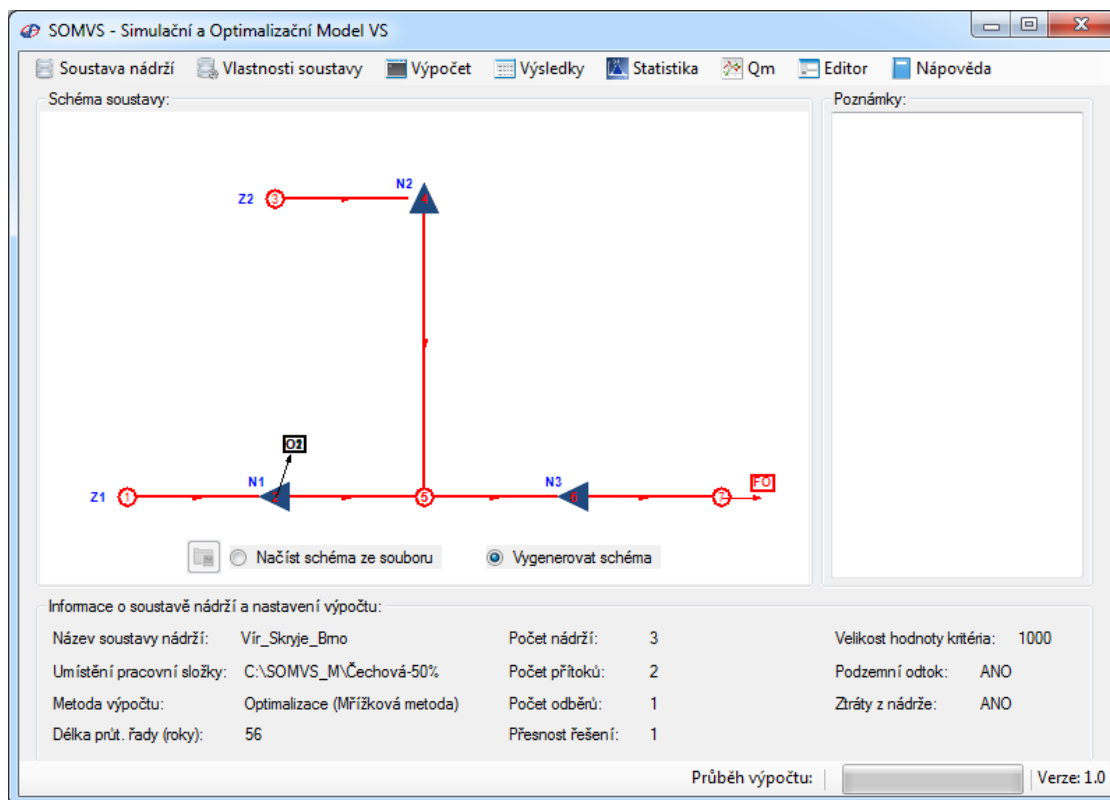
V programu SOMVS je nutné nejprve zadat ke každé nádrži v řešené vodohospodářské soustavě základní parametry, které jsou nezbytné pro provedení výpočtu. Jsou to hodnoty definující maximální a minimální interval neznámého ohodnocení, ve kterém program hledá optimální velikost zásobního objemu nádrže Skryje. Při simulačním výpočtu je potřeba vložit také hodnotu počátečního objemu v nádrži. Dále hodnoty maximálních a minimálních objemů stávajících nádrží.

Pokud jsou do výpočtu zavedeny ztráty, musí se do programu vložit jim odpovídající parametry.

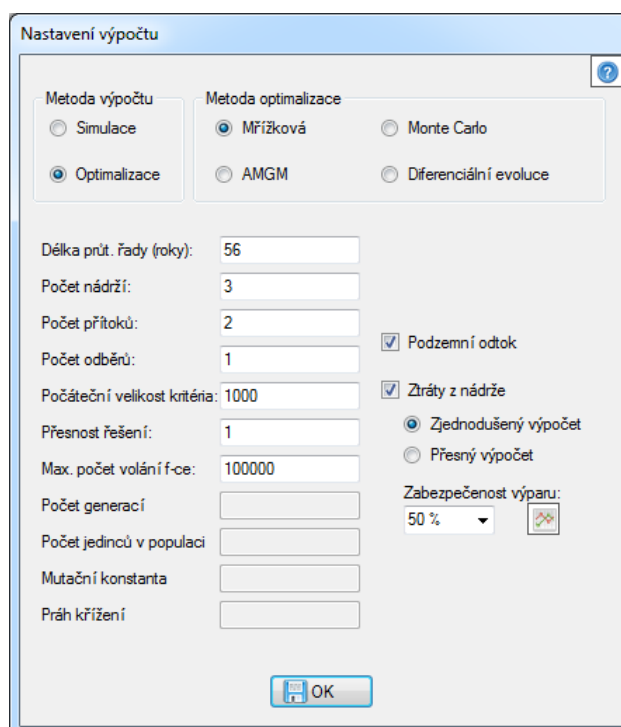
Další zadávanou položkou jsou požadované nalepšené odtoky z nádrží. Hodnoty nalepšených odtoků jsou pro všechny časové kroky stejné.

Poslední informací potřebnou pro výpočet je zadání odběru vody z nádrže. Odběr je uvažován pouze z nádrže Vír a je zadán formou průměrných měsíčních odběrů.

Na obr. 11 až obr. 21 jsou zobrazena dialogová okna pomocí, kterých jsou do programu vložena vstupní data.



**Obr. 11** Úvodní dialogové okno programu SOMVS s vygenerovaným schématem řešené VS.



**Obr. 12** Dialogové okno „Nastavení výpočtu“.



Parametry nádrží

Nádrž 1   Nádrž 2   Nádrž 3

### Nádrž 1

Stav nádrže:  
☐ Navrhovaná   ☒ Stávající

Objemy:  
Vmax [m3] 47856000  
Vmin [m3] 3800000  
Vpoč [m3] 47856000

Parametry ovlivňující ztráty z nádrže:  
Ztráty průsakem [l/s] 0.2   Ztráty netěsností uzávěru [l/s] 0.1  
Průměrná nadmožská výška vodní hladiny v nádrži [m n. m.] 455.42  
Plocha vodní hladiny vztahená k průměrné nadmožské výšce [m2] 1412720

Nalepšený odtok z nádrže [m3/s]:  
Listopad 0.65   Prosinec 0.65   Leden 0.65   Únor 0.65   Březen 0.65   Duben 0.65   Květen 0.65   Červen 0.65   Červenec 0.65   Srpen 0.65   Září 0.65   Říjen 0.65

Procentuální rozdělení ročního výparu na měsíční výpar [%]:  
Listopad 5   Prosinec 2   Leden 1   Únor 2   Březen 6   Duben 9   Květen 12   Červen 14   Červenec 16   Srpen 15   Září 11   Říjen 7

Obr. 13 Dialogové okno „Parametry nádrží“ – zjednodušený výpočet ztrát (Vir).

Parametry nádrží

Nádrž 1   Nádrž 2   Nádrž 3

### Nádrž 2

Stav nádrže:  
☒ Navrhovaná   ☐ Stávající

Objemy:  
Vmax [m3] 28000000  
Vmin [m3] 1500000  
Vpoč [m3] 28000000

Celkové ztráty vyjádřené  $Z = f(0.66V_z)$

Z [m3.rok-1]	0.66Vz [m3]
110536	495000
372856	4620000
587215	9240000
738486	13860000
1105409	27720000

Nalepšený odtok z nádrže [m3/s]:  
Listopad 0.95   Prosinec 0.95   Leden 0.95   Únor 0.95   Březen 0.95   Duben 0.95   Květen 0.95   Červen 0.95   Červenec 0.95   Srpen 0.95   Září 0.95   Říjen 0.95

Procentuální rozdělení ročního výparu na měsíční výpar [%]:  
Listopad 5   Prosinec 2   Leden 1   Únor 2   Březen 6   Duben 9   Květen 12   Červen 14   Červenec 16   Srpen 15   Září 11   Říjen 7

Obr. 14 Dialogové okno „Parametry nádrží“ – zjednodušený výpočet ztrát (Skryje).

Parametry nádrží

Nádrž 1 Nádrž 2 **Nádrž 3**

**Nádrž 3**

Stav nádrže:  
☐ Navrhovaná ☒ Stávající

Objemy:

Vmax [m3] 15102000  
Vmin [m3] 2082000  
Vpoč [m3] 15102000

Parametry ovlivňující ztráty z nádrže:

Ztráty průsakem [l/s] 0.35 Ztráty netěsností uzávěru [l/s] 0.3  
Průměrná nadmožská výška vodní hladiny v nádrži [m n. m.] 226.74  
Plocha vodní hladiny vztahená k průměrné nadmožské výšce [m2] 1683185

Nalepšený odtok z nádrže [m3/s]:

Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Konst.

Procentuální rozdělení ročního výparu na měsíční výpar [%]:

Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen
5	2	1	2	6	9	12	14	16	15	11	7

OK

**Obr. 15** Dialogové okno „Parametry nádrží“ – zjednodušený výpočet ztrát (Brno).

Hodnoty průměrných měsíčních odběrů

Soubor Úpravy

Hodnoty průměrných měsíčních odběrů:

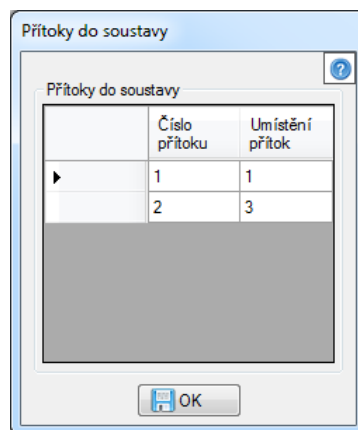
	Číslo odběru	Umístění odběru	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Říjen	Zabezpečení
► Max.	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	100
Min.	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100

Ze souboru

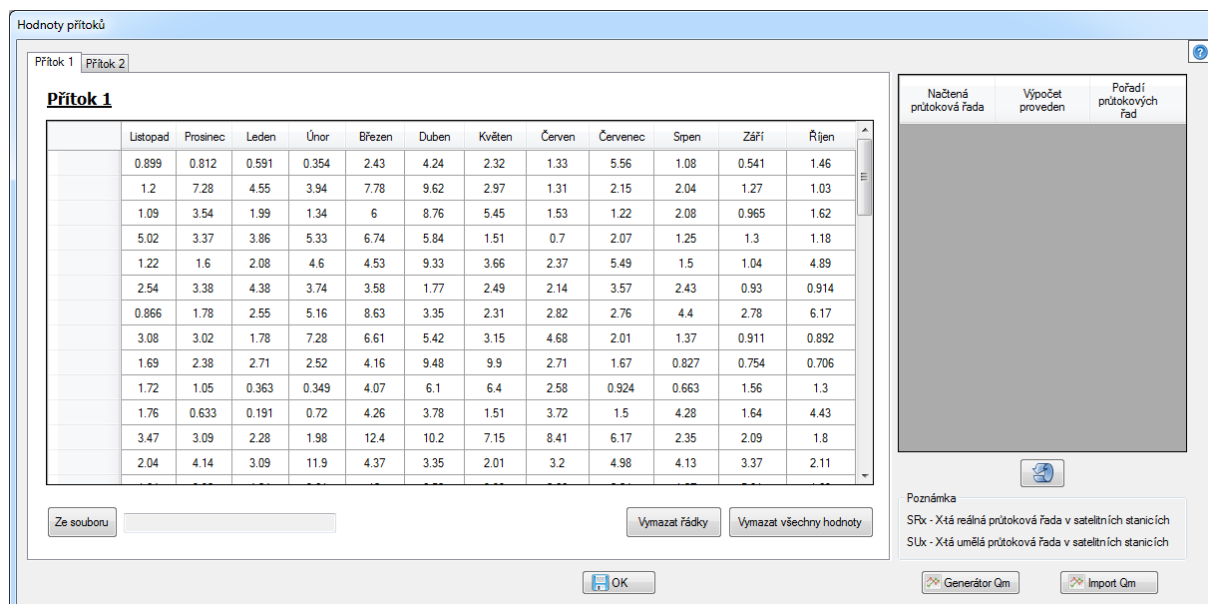
OK

Vymazat řádky Vymazat všechny hodnoty

**Obr. 16** Dialogové okno „Hodnoty průměrných měsíčních odběrů“.



**Obr. 17** Dialogové okno „Přítoky do soustavy“.



**Obr. 18** Dialogové okno „Hodnoty přítoků“ – MP Dalečín.

Hodnoty přítoků

Přítok 1 Přítok 2

**Přítok 2**

	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Sípen	Září	Říjen
	0.44	0.359	0.202	0.149	1.55	1.4	0.911	0.609	2.89	0.676	0.402	1.03
	0.605	3.76	3.01	2.07	6.55	5.31	1.19	0.636	0.95	1.12	0.794	0.63
	0.387	1.34	0.76	0.342	4.02	4.08	2.34	1.45	0.371	0.639	0.282	1.07
	2.66	2.81	1.95	2.47	3.48	3.22	0.745	0.527	0.771	0.745	0.719	0.593
	0.524	0.654	0.696	3	1.96	3.25	0.785	0.45	0.619	0.234	0.532	1.65
	0.811	1.16	2	1.58	1.49	0.801	0.717	0.31	0.839	0.606	0.271	0.273
	0.278	0.536	0.764	1.85	3.1	1.28	0.649	1.68	1.31	1.83	1.77	2.85
	1.56	1.57	0.825	3.82	2	1.54	0.96	3.31	0.78	0.483	0.302	0.582
	0.653	1.14	1.26	1.31	3.06	5.79	3.9	1.48	0.785	0.358	0.291	0.501
	1.06	0.394	0.365	0.364	3.55	2.48	2.78	1.14	0.501	0.381	0.752	0.752
	1.02	0.325	0.087	0.344	3.02	1.53	0.623	0.874	0.437	0.6	0.413	1.34
	1.17	1.28	1.36	1.57	7.29	5.46	4.35	6.01	3.75	1.06	0.938	0.873
	0.921	1.3	0.952	5.21	1.46	1.33	1.06	1.02	3.76	1.97	1.7	0.724

Ze souboru

Vymazat řádky Vymazat všechny hodnoty

OK

Nážená průtoková řada Výpočet proveden Pořadí průtokových řad

Poznámka  
SRx - Xtá reálná průtoková řada v satelitních stanicích  
SLx - Xtá umělá průtoková řada v satelitních stanicích

Generátor Qm Import Qm

**Obr. 19** Dialogové okno „Hodnoty přítoků“ – MP Skryje.

Schematizace soustavy

Soubor Úpravy

Popis jednotlivých úseků soustavy:

	Číslo vrcholu	Ústí do vrcholu	Délka	Min. průtok	Číslo nádrže	Zabezpečení	Významnost nádrže
▶	1	2	500	0.53	0	0	0
	2	5	34100	0.53	1	99.5	0
	3	4	500	0.06	0	0	0
	4	5	11700	0.06	2	99.5	0
	5	6	17800	0.6	0	0	0
	6	7	500	1.37	3	99.5	0
	7	0	0	0	0	0	0
*							

Ze souboru

OK

Vymazat řádky Vymazat všechny hodnoty

**Obr. 20** Dialogové okno „Schematizace soustavy“.

Hodnoty průměrných měsíčních odtoků ze soustavy												
Soubor Úpravy												
Hodnoty průměrných měsíčních odtoků ze soustavy:												
	Listopad	Prosinec	Leden	Únor	Březen	Duben	Květen	Červen	Červenec	Srpen	Září	Ríjen
▶	1.817	1.505	1.289	0.685	6.11	7.51	5.36	3.33	12.41	3.06	1.904	3.74
	2.49	17.72	11.37	10.63	22.02	19.92	6.25	3.78	4.1	3.78	2.98	2.79
	2.47	6.04	4.25	3.45	21.76	16.87	11.9	4.62	2.11	3.467	1.345	3.36
	9.3	8.71	7.28	10.15	13.57	14.63	3.11	1.549	3.786	2.93	3.12	2.64
	2.87	3.11	3.49	11.96	9.86	18	5.58	3.17	7.5	3.39	1.97	9.32
	5.08	7.62	10.22	7.26	8.64	3.79	4.42	2.74	5.53	3.7	1.67	1.634
	1.756	3.42	6.12	10.22	16.68	6.9	4.01	7.26	5.75	8.2	6.05	11.97
	7.37	7.08	3.36	16.82	11.18	8.59	5.16	13.47	4.1	2.75	2.151	2.552
	4.09	5.12	5.88	6.13	15.18	23.07	21.4	7.04	3.28	1.707	1.464	1.966
	4.27	2.01	1.363	1.459	13.38	14.51	13.68	5.47	2.044	1.473	3.37	2.91
	3.65	1.343	0.501	1.75	10.69	7.98	3.09	6.45	3.45	6.44	3.02	8.59
	7.32	7.52	5.46	5.27	34	23.8	18.18	26.41	15.56	5.14	4.638	4.25

Nastavená průtoková řada

Výpočet proveden

Pořadí průtokových řad

Poznámka

CRx - X-tá reálná průtoková řada v centrální stanici

CLx - X-tá umělá průtoková řada v centrální stanici

Ze souboru

OK

Vymazat řádky

Vymazat všechny hodnoty

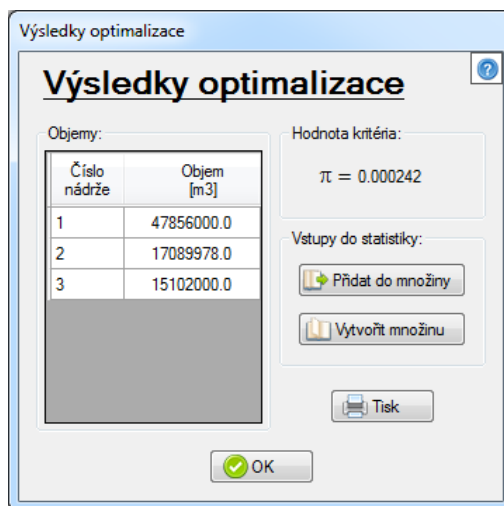
**Obr. 21** Dialogové okno „Hodnoty průměrných měsíčních odtoků ze soustavy“.

K nalezení optimálních velikostí zásobního objemu navrhované nádrže Skryje jsou použity všechny optimalizační metody v programu zahrnuté. Parametry výpočtu pro jednotlivé optimalizace jsou uvedeny v tab. 24. Uvedené hodnoty parametrů jsou doporučeny vedoucím práce.

**Tab. 24** Parametry optimalizačních metod.

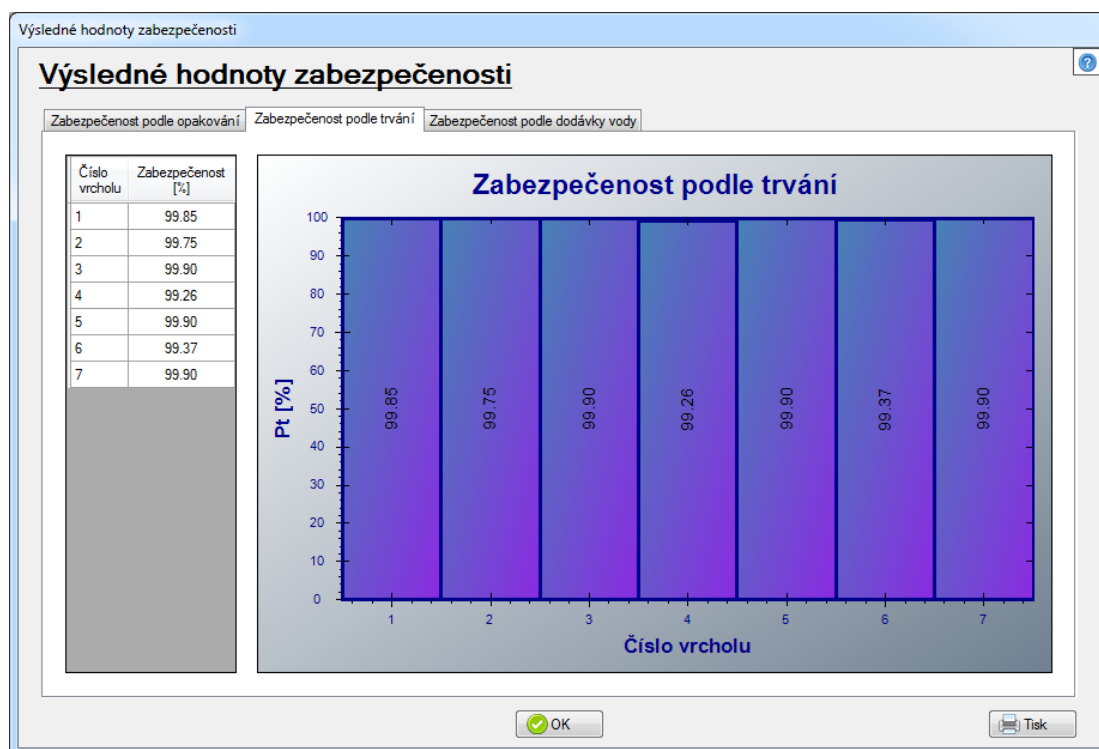
	Mřížková metoda	Monte Carlo metoda	MGM	Metoda diferenciální evoluce
Přesnost řešení	1000	—	—	—
Max. počet volání fce	100000	—	—	—
Počet pseudonáhodně generovaných čísel	—	100000	—	—
Počet subintervalů	—	—	50	—
Počet generací	—	—	—	400
Počet jedinců v populaci	—	—	—	400
Mutační konstanta	—	—	—	0,6
Práh křížení	—	—	—	0,8

Nalezené optimální velikosti zásobního objemu nádrže Skryje jsou po provedení výpočtu zobrazeny v dialogovém okně „Výsledky optimalizace“ obr. 22.



**Obr. 22** Dialogové okno „Výsledky optimalizace“.

V dialogovém okně „Výsledné hodnoty zabezpečení“ obr. 23 jsou po provedení výpočtu zobrazeny dosažené hodnoty zabezpečení hran grafu vycházejících z jednotlivých vrcholů grafu.



**Obr. 23** Dialogové okno „Výsledné hodnoty zabezpečení“.

#### 4.5. Výstupy z programu

Pro čtyři optimalizační metody a pro vybrané stupně zabezpečení výparu jsou nalezeny optimální velikosti zásobního objemu nádrže Skryje. Nalezené velikosti zásobních objemů jsou pro přehlednost uvedeny v tab. 25.

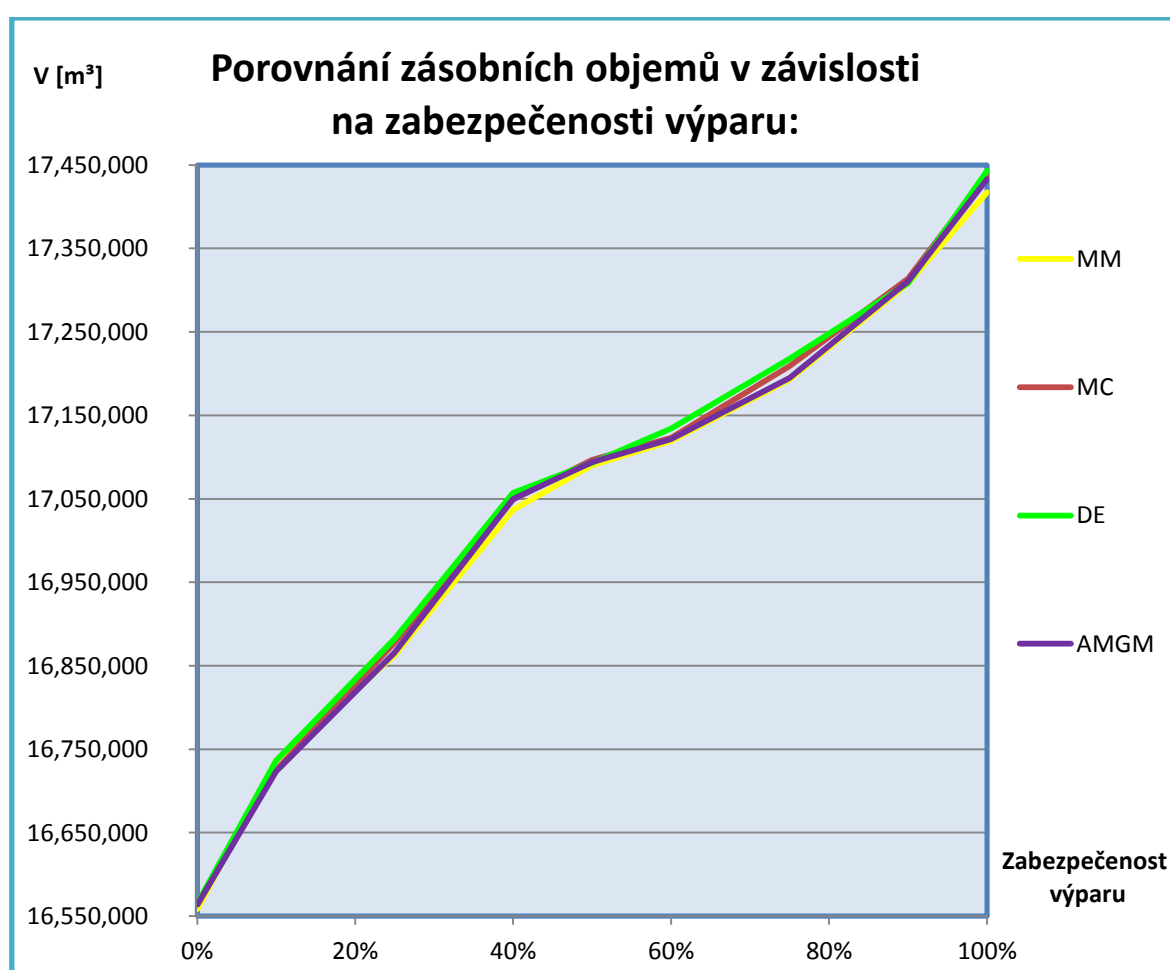
**Tab. 25** Výsledné optimální velikosti zásobního objemu nádrže Skryje v  $m^3$ .

Zabezpečení výparu [%]	MM	MC	MGM	DE
100	17 417 488	17 438 334	17 433 131	17 442 914
90	17 307 938	17 313 790	17 310 584	17 308 496
75	17 192 986	17 208 976	17 194 777	17 217 900
60	17 119 098	17 122 948	17 121 569	17 134 144
50	17 089 978	17 096 804	17 093 924	17 093 008
40	17 036 774	17 048 960	17 049 940	17 057 104
25	16 862 606	16 877 494	16 865 868	16 882 150
10	16 736 403	16 724 810	16 723 550	16 736 414
0	16 558 353	16 563 849	16 563 849	16 565 243

## 5. Shrnutí výsledků

Na obr. 13 si lze všimnout, že všechny čtyři optimalizační metody jsou si výsledky velmi blízké. Největší rozdíly jsou mezi modifikovanou gradientní metodou a metodou diferenciální evoluce. Rozdíly mezi hodnotami při nulové a stoprocentní zabezpečení výparu se u všech optimalizačních metod liší v řádu  $800\,000\text{ m}^3$ . Nejmenší vypočtená hodnota zásobního objemu je  $16\,558\,353\text{ m}^3$  u mřížkové metody, naopak největší je  $17\,442\,914\text{ m}^3$  u metody diferenciální evoluce.

Z grafu na obr. 13 se dá pozorovat, že při zvyšujícím se stupni zabezpečení výparu roste velikost zásobního objemu nádrže.

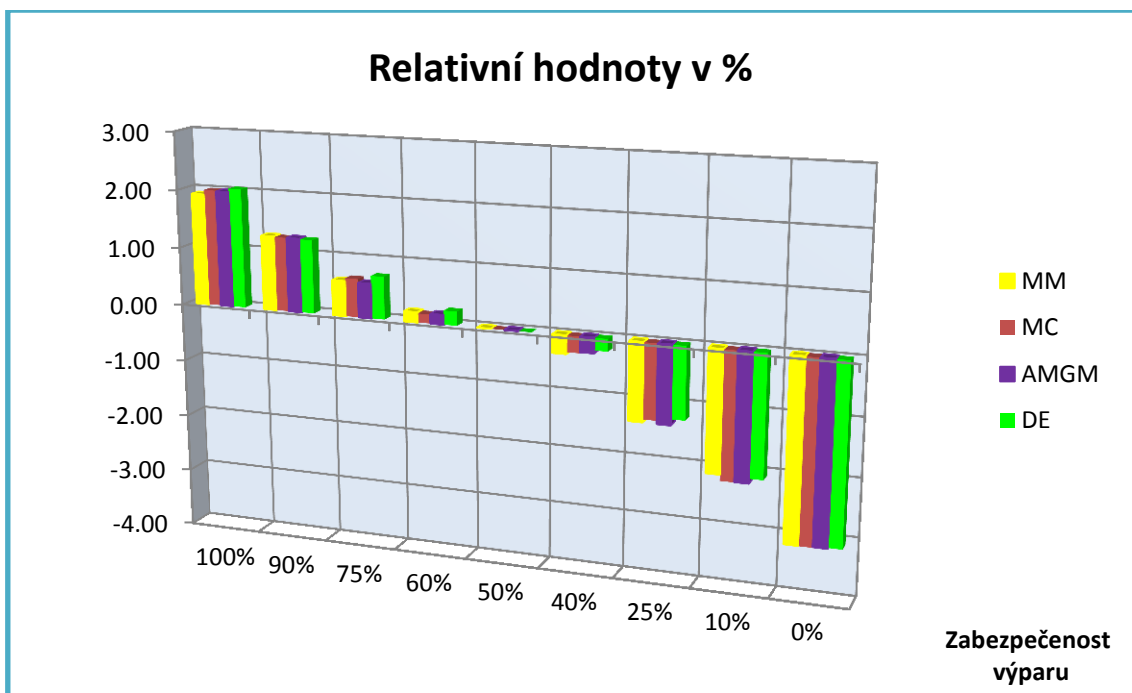


**Obr. 24** Zobrazení rozdílů při použití optimalizačních metod.

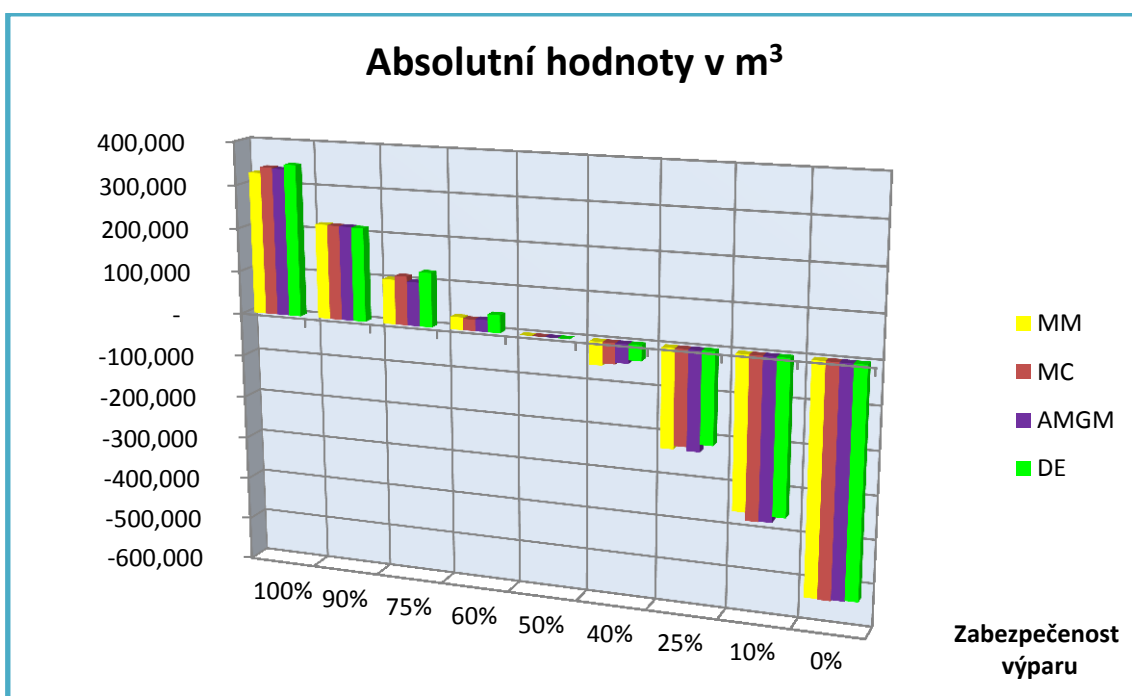
V grafech na obr. 14 a obr. 15 je zobrazeno o kolik procent se zvýší či sníží zásobní objem, při zvýšení nebo snížení stupně zabezpečení výparu, oproti objemu, který byl stanoven při padesáti procentní zabezpečení.



Je zde také patrné, že narůstání zásobního objemu je od nulové do padesátiprocentní zabezpečení výrazně vyšší než při zvyšování zabezpečení nad padesát procent. Tento rozdíl činí cca jednu třetinu zásobního objemu.



**Obr. 25** Zobrazení odchylek od průměrného objemu nádrží, objemy zadány relativně.



**Obr. 26** Zobrazení odchylek od průměrného objemu nádrží, objemy zadány absolutně.

## 6. Závěr

Cílem práce bylo provést analýzu účinku ztrát vody výparem na vodohospodářské řešení zásobní funkce soustavy nádrží. Řešení bylo provedeno simulačním modelem ve všech optimalizačních metodách, které jsou zahrnuty v programu SOMVS. Řešení je provedeno v reálné průtokové řadě dlouhé 52 let. Dosažené optimální velikosti zásobních objemů nádrže Skryje pro vybrané stupně zabezpečení jsou logické a odpovídají předpokladu, že se vzrůstající zabezpečení výparu se zvětšuje požadavek na velikost zásobního objemu.

Projevilo se, že stupeň zabezpečení výparu má nezanedbatelný vliv na zásobní objem. Rozdíl mezi nejmenší a stoprocentní zabezpečení je v řádu 850 000 m<sup>3</sup>. Jednotlivé zabezpečení se jedna od druhé liší v řádu 100 000 m<sup>3</sup>, při čemž rozdíl klesá okolo průměrné zabezpečení.

Do budoucna, na příklad v rámci diplomové práce může být ověřeno, jak moc se projeví vliv zabezpečení výparu při vodohospodářském řešení zásobní funkce provedeného v umělých průtokových řadách. Úhrny výparu mohou být zpřesněny kalkulací po jednotlivých měsících oproti počítání za rok. Nyní bylo řešení provedeno pro průměrné měsíční úhrny výparu, dále může být řešení provedeno pro minimální, maximální, suchý a také vlhký rok. Pro celkové srovnání by v budoucnu mohlo být také zajímavé, kdyby se v řešení uvažovalo s přesným výpočtem ztrát vody z nádrží.

## Seznam použitých zdrojů

MENŠÍK, Pavel. Automatizace řešení zásobní funkce vodohospodářské soustavy. Brno, 2012. 180 s. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodního hospodářství krajiny. Školitel prof. Ing. Miloš Starý, CSc.

MENŠÍK, P.; STARÝ, M.: SOMVS; SOMVS - Simulační a Optimalizační Model Vodohospodářské Soustavy. URL: <http://uvhk.fce.vutbr.cz/software.php>. (software).

Povodí Moravy, s. p. Manipulační řád pro vodní dílo Vír I na řece Svratce v km 114,90. Brno, 2011

Povodí Moravy, s. p. Manipulační řád pro vodní dílo Brno na řece Svratce v km 56,19. Brno, 2008

Povodí Moravy, s. p. [online]. Dostupné z <http://www.pmo.cz>

Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 01). Brno: VUT, 2006, 120 s.

Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy (MODUL 02). Brno: VUT, 2006, 117 s.

Starý, M. Nádrže a vodohospodářské soustavy. 1. vyd. Brno: VUT, 1986. 165 s.

Zelinka, I. Umělá inteligence v problémech globální optimalizace. BEN, 2002, 232 s. ISBN 80-7300-069-5.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

$A_j$	průtočná plocha ve vrcholu $n_j$	$[m^2]$
$A(j)$	množina všech hran $h_{i,j}$ , které předávají vodu $n_j$	$[1]$
$B(j)$	množina všech hran $h_{j,k}$ , kterými odtéká voda z vrcholu $n_j$	$[1]$
$C(z)$	množina všech hran $h_{z,j}$ , kterými přitéká voda z vrcholu $n_z$ do systému	$[1]$
$F_j$	plocha vodní hladiny nádrže ve vrcholu $n_j$	$[m^2]$
$H$	množina hran grafu	$[1]$
$H_j$	nadmořská výška vodní hladiny nádrže ve vrcholu $n_j$	$[m \text{ n. m.}]$
$I_j$	hydraulický spád ve vrcholu $n_j$	$[1]$
$K_j$	koeficient filtrace ve vrcholu $n_j$	$[m.s^{-1}]$
$L_{i,j}$	délka hrany grafu $h_{i,j}$	$[m]$
$n_i$	$i$ -tý vrchol grafu	$[1]$
$n_j$	$j$ -tý vrchol grafu	$[1]$
$N$	množina vrcholů grafu	$[1]$
$N$	počet řešených časových kroků	$[1]$
$O$	podmnožina odběratelů	$[1]$
$O_P$	nalepšený odtok	$[m^3.s^{-1}]$
$P$	hydrologická zabezpečenost	$[\%]$
$P^N$	normativní (požadovaná) hydrologická zabezpečenost	$[\%]$
$Q_{i,j}^\tau$	průtok hranou $h_{i,j}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$Q_{j,k}^\tau$	průtok hranou $h_{j,k}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$\check{Q}_{i,j}^\tau$	maximální průtok hranou $h_{i,j}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$\hat{Q}_{i,j}^\tau$	minimální průtok hranou $h_{i,j}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$Q_{i,o}^\tau$	odběr hranou $h_{i,o}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$\check{Q}_o^\tau$	maximální odběr ve vrcholu $n_o$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$\hat{Q}_o^\tau$	minimální odběr ve vrcholu $n_o$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$Q_{PO_{i,j}}^\tau$	podzemní přítok hranou $h_{i,j}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$Q_z^\tau$	hodnota přítoku do vrcholu $z$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$Q_{z,j}^\tau$	průtok hranou $h_{z,j}$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3.s^{-1}]$
$V_{jz}$	zásobní objem nádrže ve vrcholu $n_j$	$[m^3]$
$V_{jS}$	objem stálého nadržení nádrže ve vrcholu $n_j$	$[m^3]$
$\bar{V}_j^\tau$	průměrné plnění nádrže ve vrcholu $n_j$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3]$
$V_j^\tau$	objem vody ve vrcholu $n_j$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3]$
$V_j^{\tau-1}$	objem vody v nádrži ve vrcholu $n_j$ v časovém kroku $\tau - 1$	$[m^3]$
$V_j^{\text{MAX}}$	maximálně možný objem vody v nádrži ve vrcholu $n_j$	$[m^3]$
$V_j^{\text{MIN}}$	minimálně možný objem vody v nádrži ve vrcholu $n_j$	$[m^3]$
$\check{V}_j^\tau$	maximální objem vody ve vrcholu $n_j$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3]$
$\hat{V}_j^\tau$	minimální objem vody ve vrcholu $n_j$ v časovém kroku $\tau$	$[m^3]$

$VH$	množina vybraných vnitřních hran, ve kterých je počítána zabezpečení	[1]
$V_Z$	zásobní objem nádrže	[m <sup>3</sup> ]
$\underline{X}$	vektor neznámých	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Z$	podmnožina vodních zdrojů	[1]
$Z_j^{NU}$	ztráty vody netěsností uzávěrů	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Z_j^P$	ztráty vody průsakem	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Z_j^V$	ztráty vody výparem	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$Z_j(V_j^\tau)$	ztrátový průtok z vrcholu $n_j$ v časovém kroku $\tau$	[m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$\Delta t$	délka časového kroku	[měsíc]
$\pi$	hodnota kritéria	[1]
$\tau$	pořadí časových kroků	[1]
$\sim, \wedge$	horní a dolní mez příslušného intervalu	[1]

## Seznam obrázků a tabulek

### Obrázky:

<b>Obr. 1</b> Vybraná vodohospodářská soustava, převzato z (Menšík, 2012).	2
<b>Obr. 2</b> Přehrada Vír.	3
<b>Obr. 3</b> Katastrální mapa obce Skryje a okolí M 1:22 000,	4
<b>Obr. 4</b> Brněnská přehrada.	5
<b>Obr. 5</b> Příklad orientovaného grafu, převzato z (Menšík, 2012).	8
<b>Obr. 6</b> Volba parametrů v klasickém simulačním modelu, převzato z (Starý, 2006).	13
<b>Obr. 7</b> Pseudonáhodné vzorkování parametrů v simulačním modelu, převzato z (Starý, 2006).	14
<b>Obr. 8</b> Úhrn ročního výparu v závislosti na nadmořské výšce a stupni zabezpečení.	16
<b>Obr. 9</b> Orientovaný graf pro uvažovaný subsystém nádrží.	21
<b>Obr. 10</b> Graf závislosti celkových ztrát vody z nádrže Skryje na objemu pro vybrané stupně zabezpečení výparu.	30
<b>Obr. 11</b> Úvodní dialogové okno programu SOMVS s vygenerovaným schématem řešené VS.	33
<b>Obr. 12</b> Dialogové okno „Nastavení výpočtu“.	33
<b>Obr. 13</b> Dialogové okno „Parametry nádrží“ – zjednodušený výpočet ztrát (Vír).	34
<b>Obr. 14</b> Dialogové okno „Parametry nádrží“ – zjednodušený výpočet ztrát (Skryje).	34
<b>Obr. 15</b> Dialogové okno „Parametry nádrží“ – zjednodušený výpočet ztrát (Brno).	35
<b>Obr. 16</b> Dialogové okno „Hodnoty průměrných měsíčních odběrů“.	35
<b>Obr. 17</b> Dialogové okno „Přítoky do soustavy“.	36
<b>Obr. 18</b> Dialogové okno „Hodnoty přítoků“ – MP Dalečín.	36
<b>Obr. 19</b> Dialogové okno „Hodnoty přítoků“ – MP Skryje.	37
<b>Obr. 20</b> Dialogové okno „Schematizace soustavy“.	37
<b>Obr. 21</b> Dialogové okno „Hodnoty průměrných měsíčních odtoků ze soustavy“.	38
<b>Obr. 22</b> Dialogové okno „Výsledky optimalizace“.	39
<b>Obr. 23</b> Dialogové okno „Výsledné hodnoty zabezpečení“.	39
<b>Obr. 13</b> Zobrazení rozdílů při použití optimalizačních metod.	41
<b>Obr. 14</b> Zobrazení odchylek od průměrného objemu nádrží, objemy zadány relativně.	42
<b>Obr. 15</b> Zobrazení odchylek od průměrného objemu nádrží, objemy zadány absolutně.	42

## Tabulky:

<b>Tab. 1</b> Základní informace o nádrži Vír. ....	3
<b>Tab. 2</b> Základní informace o nádrži Skryje. ....	4
<b>Tab. 3</b> Základní informace o nádrži Brno. ....	5
<b>Tab. 4</b> Procentuální rozdělení ročního výparu na každý měsíc (%). ....	17
<b>Tab. 5</b> Kódová čísla definující. ....	22
<b>Tab. 6</b> Minimální, nalepšené a neškodné průtoky v hranách grafu. ....	22
<b>Tab. 7</b> Průměrné měsíční odběry z nádrže Vír v m <sup>3</sup> /s. ....	23
<b>Tab. 8</b> Maximální, minimální a počáteční objemy stávajících nádrží. ....	23
<b>Tab. 9</b> Paušální hodnoty ztrát pro stávající nádrže. ....	24
<b>Tab. 10</b> Hodnoty pro stanovení ztrát vody výparem pro stávající nádrže. ....	24
<b>Tab. 11</b> Souřadnice bodů batygrafických čar nádrže Skryje (j=4). ....	25
<b>Tab. 12</b> Souřadnice bodů ztrát průsakem a netěsností uzávěrů. ....	26
<b>Tab. 13</b> Průsaky na významných přehradách v České republice. ....	26
<b>Tab. 14</b> Hodnoty celkových ročních ztrát průsakem a netěsností uzávěrů. ....	27
<b>Tab. 15</b> Minimální zabezpečení. ....	28
<b>Tab. 16</b> Zabezpečení výparu 10%. ....	28
<b>Tab. 17</b> Zabezpečení výparu 25%. ....	28
<b>Tab. 18</b> Zabezpečení výparu 40%. ....	28
<b>Tab. 19</b> Zabezpečení výparu 50%. ....	29
<b>Tab. 20</b> Zabezpečení výparu 60%. ....	29
<b>Tab. 21</b> Zabezpečení výparu 75%. ....	29
<b>Tab. 22</b> Zabezpečení výparu 90%. ....	29
<b>Tab. 23</b> Zabezpečení výparu 100%. ....	29
<b>Tab. 24</b> Parametry optimalizačních metod. ....	38
<b>Tab. 25</b> Výsledné optimální velikosti zásobního objemu nádrže Skryje v m <sup>3</sup> . ....	40